



平成 21 年度 修士論文

技術動向調査に基づいた
センサデバイスの省電力制御
プログラム作成支援ツールの構築

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報システム基盤学専攻

0853014 立澤 正樹

指導教員 多田 好克 教授
小宮 常康 准教授
古賀 久志 准教授

提出日 平成 22 年 1 月 28 日

目次

第 1 章	序論	7
1.1	背景	7
1.1.1	ユビキタスネットワーク技術の拡がり	7
1.1.2	電力供給問題と省電力制御	9
1.2	目的	10
1.2.1	目的	10
1.2.2	ツール構成	12
1.3	用語定義	13
1.4	本論文の構成	14
第 2 章	関連研究・関連技術	15
2.1	関連研究	15
2.2	関連技術	17
2.2.1	MoteView	17
2.2.2	TOSSIM	19
2.2.3	Power TOSSIM	19
第 3 章	技術動向調査	21
3.1	技術動向調査の概略	21
3.2	センサネットワーク技術の技術動向調査	23
3.2.1	目的	23
3.2.2	調査範囲	23
3.2.3	分析の方向性	24
3.2.4	分析結果データとその考察	28

3.2.5	分析結果のツールへの利用	34
第 4 章	センサネットワークと省電力制御	36
4.1	センサネットワークの概要	36
4.2	センサネットワークとセンサ	38
4.2.1	センサネットワーク	38
4.2.2	センサ	38
4.3	センサデバイスの要件	40
4.4	既存のセンサデバイス	42
4.5	MICA MOTE	44
4.5.1	基本仕様	44
4.5.2	TinyOS と制御プログラム	45
4.6	センサデバイスの省電力制御	46
4.6.1	電力供給問題解決へのアプローチ	46
4.6.2	本研究におけるアプローチ	48
第 5 章	省電力制御プログラム作成支援ツール	49
5.1	概要	49
5.2	実装	52
5.2.1	実装の流れ	52
5.2.2	実装環境	53
5.2.3	前提条件及び制約条件	55
5.2.4	実験	57
5.2.5	予備実験	58
5.2.6	ツール本体の作成	61
5.3	ツールの利用方法	62
第 6 章	評価と考察	64

第 7 章 結論	66
7.1 まとめ	66
7.2 今後の課題	67

図目次

1.1	万博アメダスシステム概念図（図は参考文献 [2] より引用）	8
1.2	学童見守り社会実験（図は参考文献 [3] より引用）	8
1.3	ツールの概要	12
1.4	定義した用語の関係	13
2.1	Applilet EZ PL（図は参考文献 [11] より引用）	17
2.2	MOTE による設定画面（図は参考文献 [14] より引用）	18
2.3	MOTE による監視画面（図は参考文献 [14] より引用）	18
3.1	技術動向調査の手法	22
3.2	出願年別出願件数	28
3.3	出願年別出願件数（省電力制御関連）	29
3.4	出願人別出願割合	30
3.5	省電力技術の推移	31
3.6	省電力技術の詳細	31
3.7	適用分野数の推移	32
3.8	適用分野の詳細	33
3.9	分析結果のツールへの利用	35
4.1	センサネットワーク	37
4.2	センサ基盤 (Crossbow MTS300)（図は参考文献 [28] より引用）	44
4.3	無線端末 (Crossbow MICA2)（図は参考文献 [28] より引用）	44
4.4	サンプリング過程の概念図	45
5.1	ツール設定画面	50
5.2	ツール結果画面	50

5.3	センサデバイス (Crossbow Mica2MOTE) (図は参考文献 [28] より引用)	53
5.4	搭載センサボード (Crossbow MDA300) (図は参考文献 [28] より引用)	53
5.5	条件設定画面	62
5.6	制御プログラム選択	63
5.7	制御プログラム生成	63

表目次

3.1	分析軸（ユーザステータス）	25
3.2	分析軸（省電力技術）	25
3.3	適用分野分析軸（情報、サービスによる分類）	27
3.4	具体的適用事例の詳細	34
4.1	センサネットワークの利用例	37
4.2	センサネットワークの接続構成ごとの利点と欠点	38
4.3	センサの種類	39
5.1	対象機材	53
5.2	Mica2MOTE のスペック	54
5.3	搭載センサのスペック	54
5.4	実験に用いた計算機環境	55
5.5	予備実験結果	59
5.6	実験で用いる配置数、シミュレーション時間	61
6.1	制御プログラム作成工程の比較	64

第 1 章

序論

本章では、本論文が前提とする環境を概説するとともに、本論文の目的を述べる。

1.1 背景

1.1.1 ユビキタスネットワーク技術の拡がり

いつでも、どこでも、何でもつながり、ユーザがコンピュータやネットワークの存在を意識することなく利用できる「ユビキタスネットワーク」の研究が進められ、人間生活を支援する技術が開発されている [1]。このような支援技術の一つにセンサネットワークがある。センサネットワークは、多数のセンサデバイスをネットワークで結合し、ユビキタスネットワークでの情報収集の役割を担っている。たとえば、山岳部における自然環境観測による防災対策と言ったセンサデバイスを広範囲に配置した適用例、または、ビル環境管理と言ったセンサデバイスを狭範囲へ配置した適用例がある。より具体的には、環境モニタリングを行った 2005 年日本国際博覧会会場における「万博アメダス」(図 1.1)[2]、松下電器産業による「学童見守り社会実験」(図 1.2)[3] 等の実際の適用例がある。

このように、様々な分野においてセンサネットワークの技術は適用されており、あわせて新たな分野への適用が各方面において研究されている。そして、その技術適用の拡がりに関し、それらを実感的、定性的に理解することは可能である一方で、それらを定量的に示した研究、報告書等は存在せず、拡がりをより客観的

に理解することは従来困難であった。定量的に理解することでセンサネットワーク技術の需要が見込まれる分野を客観的に知ることができるなどの利点がある。

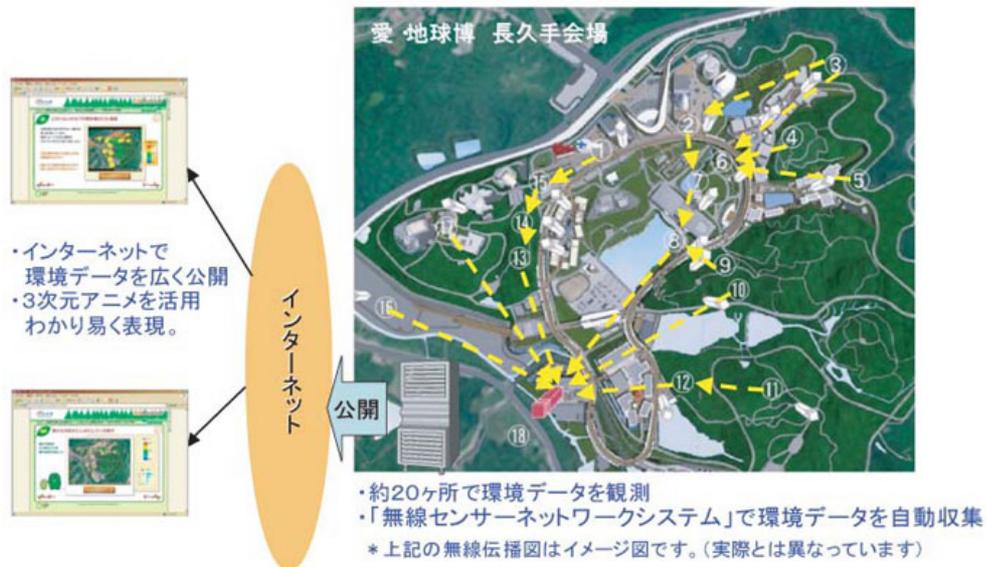


図 1.1: 万博アメダスシステム概念図 (図は参考文献 [2] より引用)

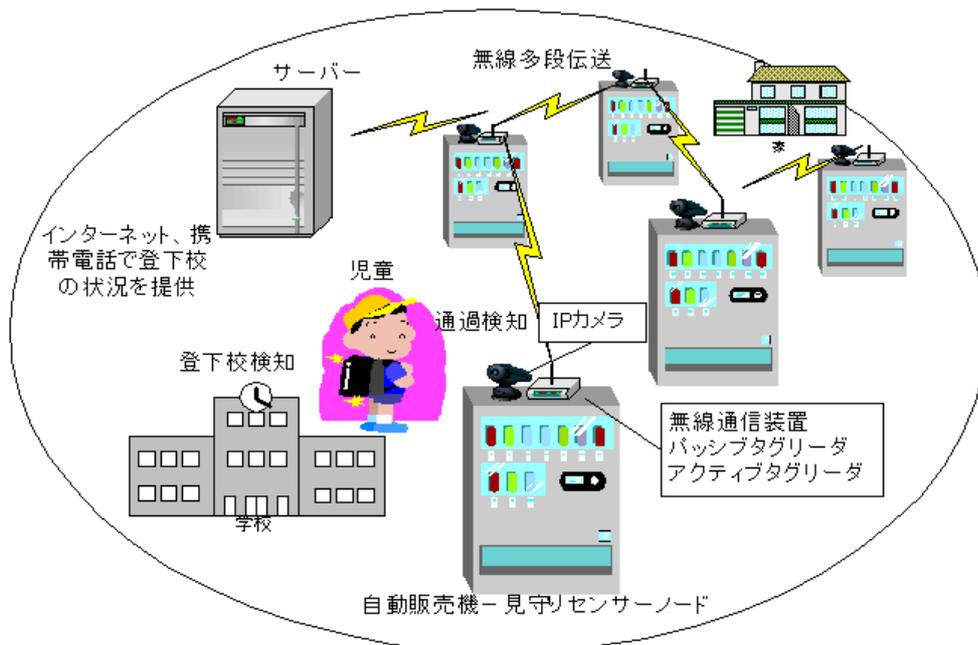


図 1.2: 学童見守り社会実験 (図は参考文献 [3] より引用)

1.1.2 電力供給問題と省電力制御

ネットワーク化された各センサデバイスの駆動は、その多くが電池のみからの電力供給により行われており、その寿命は長くても1~2年程度である。そのため、センサデバイスによる情報収集の長期間運用を考えた場合、いかに電力を継続的に供給するののかという問題が生じている [1][4][5]。この問題に対して、電池交換もしくは電源線の設置により電力を継続的に供給する解決策がある。ただし、センサネットワークの適用範囲が広がるにつれ、電力供給を行うための電池交換、電力線設置はコストの面からも無視できなくなる。たとえば、山岳部における自然環境観測による防災対策と言った広範囲に適用する場合などであり、それは現実的なものではない。そのため、限られた電力量の中でより長期間運用を可能にする省電力制御が注目されている。

しかし、省電力制御を行うためのプログラム作成は、通常のプログラム作成に比べ困難である。なぜならば、通常のプログラム作成に加えて、省電力用の制御プログラムとセンシング間隔や通信間隔といった各種パラメータをセンサネットワークを構成するセンサデバイスの適用例に応じて取捨選択する必要があるためである。

従来、システムを導入するシステム開発者向けにセンサデバイスの制御プログラムを作成する GUI ツールは存在した。しかし、省電力制御を行うことを考慮しておらず、省電力制御を実現するためには先と同様に各種パラメータの取捨選択が必要となり、GUI ツールの利便性を損ねていた。

このように、センサネットワーク技術の適用範囲をより一層広げるには、省電力制御を実現すること、及び、その導入を容易にすることが重要である。

1.2 目的

1.2.1 目的

従来センサネットワーク技術には以下の2つの課題が存在した。

- センサネットワーク技術の拡がりを定量的により具体的に理解することは従来困難であったこと。
- センサネットワークを構成するセンサデバイスに内在する電力供給問題に対する解決方法である省電力制御を行うための制御プログラム作成がシステム開発者においても困難であったこと。

そこでこの2つの課題を解決するため、以下の2つを本論文の目的とする。

- センサネットワーク技術の拡がり、特に省電力制御に関連した技術の拡がりを定量的に示し、具体的適用分野に基づきその拡がりを分類すること。
- システム開発者をターゲットとした省電力制御プログラム作成を支援するツールを提供し、可能な限り開発者のプログラム作成労力を減らすこと。

そして、この2つの目的は、それぞれ以下の手段により実現される。

- 開発された技術の技術文献的性質を示す特許出願に注目し、特に特許出願を用いて調査する手法である特許出願技術動向調査を用いて、センサネットワーク技術における省電力に関連した技術の拡がりを定量的に示すこと。
- 対象とするセンサデバイスである MOTE[6] のシミュレーション環境 Power TOSSIM[7] を用いて実験を行い、そこで得られたパラメータを用いて、省電力制御プログラムを支援するツールを提供すること。

さらに、特許出願技術動向調査を用いて得られたセンサネットワーク技術の省電力に関連した技術の拡がりを示す情報をツール作成の際に利用する。具体的には、

適用される事例の詳細な情報を利用して、ツールの利用範囲を決定し、ツールで条件設定を行う際の入力補助手段の作成を行う。この工夫により利用頻度が高い状況への適用の補助となり、条件設定の際、設定すべき条件の範囲が限定されるため、システム開発者の更なる利便性が実現される。

1.2.2 ツール構成

本節では、提供する省電力制御プログラム作成ツールの構成を示す。図 1.3 はツールの概要である。

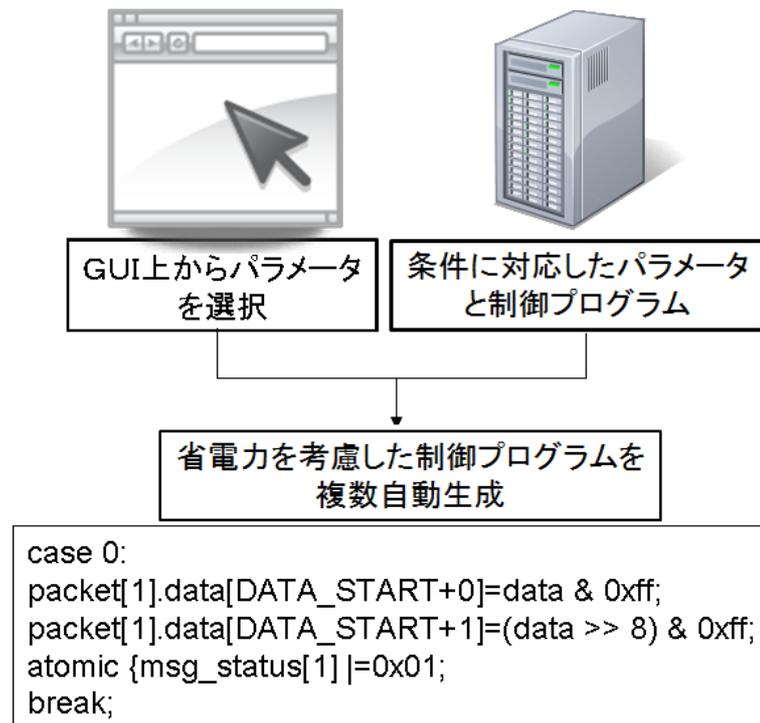


図 1.3: ツールの概要

ツールは、以下に示す簡単な手順で省電力制御プログラムの作成が可能となっている。

- GUI上からセンサネットワークを構成するセンサデバイスの使用状況、設定、環境、目的等、必要なパラメータを選択
- 条件に応じた省電力制御プログラムの候補を複数自動生成

さらにツールのパラメータ設定の際、入力補助手段が必要な項目、設定範囲のみの選択を可能となるようにしており、ツール使用者の利便性を向上させている。この入力補助手段は、センサネットワーク技術の拡がりを定量的に示した技術動向調査の結果に基づいている。

1.3 用語定義

本論文で使用する用語の定義を以下に示す。図 1.4 は用語それぞれの関係を示した図である。

- センサ
実世界において各種の情報を計測するハードウェアデバイス
- センシングデータ
実世界における物理量などをセンサにより計測したデータ
- センサデバイス
一つまたは複数のセンサが搭載され、センシングデータの送信機能を有するハードウェアデバイス
- センサネットワーク
複数のセンサデバイスがネットワークで結合され、それぞれ情報収集の役割を担うネットワーク

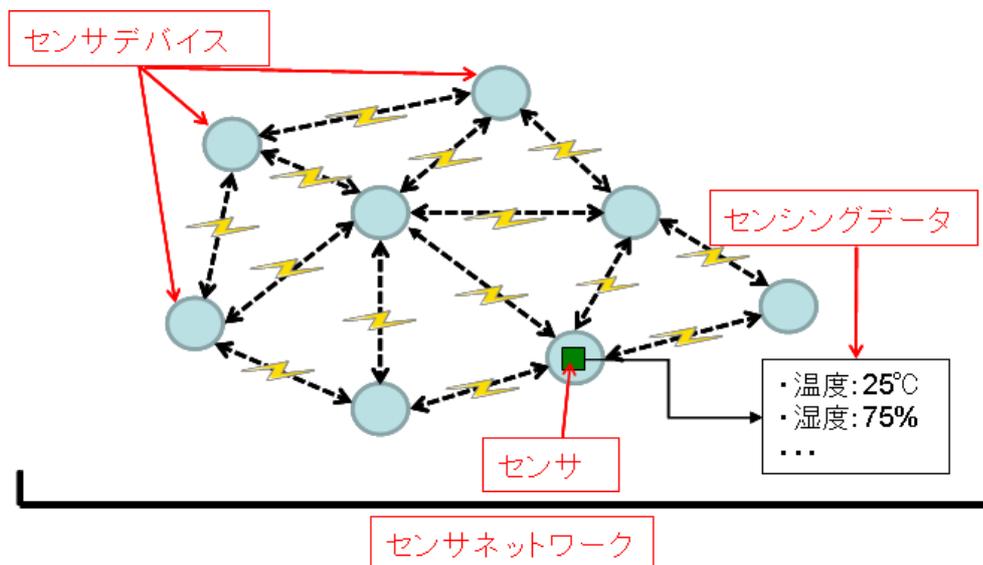


図 1.4: 定義した用語の関係

1.4 本論文の構成

本論文は全7章から成り、以下のような構成になっている。

まず第1章で本研究に関する序論として背景と目的を述べた。第2章ではセンサネットワーク技術の拡がり、省電力制御に関する関連研究や関連技術を述べる。第3章では技術動向調査の概要を述べ、それをを用いたセンサネットワーク技術の拡がりを定量的に示す。第4章ではセンサネットワーク及び本研究で用いたセンサデバイス MOTE[6] の概要を述べ、センサを搭載したセンサデバイスにおける省電力制御について述べる。第5章では省電力制御プログラム作成支援ツールの概要、前提条件、制約条件を含む実装、及び、実装を行うための実験について述べ、第6章において作成されたツールの評価と考察を行う。そして最後に第7章で本研究についてまとめる。

第 2 章

関連研究・関連技術

本章では、本研究の関連研究及び提供するツール作成に関連した技術について述べる。

2.1 関連研究

センサネットワークの技術は、様々な応用分野へ適用され、有用かつ重要な技術として期待されている。たとえば、総務省が中心となって、「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」[8]を立ち上げ、研究開発を支援している。このように国がその体制作りを支援していることからその有効性、重要性が理解できる。

また、技術をより発展させ、その拡がりを理解するための資料として、社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA) や電気学会のセンサネットワーク調査専門委員会による報告書 [9][10] が作成されている。

しかし、それらはセンサネットワーク技術の拡がりに関し、その実例の一部を挙げ説明しているのみで、技術すべてを網羅したものではなかった。また、それらを参照することにより、センサネットワーク技術の拡がりを感覚的、定性的に理解することは可能であったが、拡がりを定量的に理解できるものではなかった。

一方、電池駆動されているセンサデバイスが内在する電力供給問題を解決しようとする研究も様々行われている。たとえば、センサネットワークを構成するセン

サデバイスの省電力制御を実現しようとした研究には、Lee らによるもの [5] がある。これは各センサデバイスで取得されたセンシングデータ転送の際のプロトコルを工夫することによりセンサネットワーク全体の消費電力削減を実現しているものであり、各センサデバイス自体の制御を工夫したものではない。

また、制御ソフトウェアの作成を、GUI 上における条件を選択のみで自動的に行うアプリケーションは従来様々なものが存在した。以下に示すアプリケーションは、制御プログラム開発者の利便性を向上するために GUI 上での操作を可能にしたものである。しかし、これらアプリケーションは省電力制御を行うことについて考慮されていない。

- Applilet EZ PL (図 2.1) [11]

プログラミング言語を用いずにパズル感覚でマイコン応用ソフトウェアを簡単に作成することができるプログラミングソフトウェア。マイコンを使用したシステムの基本動作の学習に用いられる。

- PSoC Designer [12]

コード不要プログラミングモードと高レベル言語プログラミングモードの両方を 1 つのパッケージに備えた統合デザイン環境。ドラッグアンドドロップのビジュアルデザインモードでプロジェクトを開始した後、C 言語によるコードベースのデザインに移行し、プロジェクトを再調整したりカスタマイズしたりできるように操作をはずべて単一のツール内で行えるようにした環境。

- LEGO MINDSTORM [13]

レゴブロックとコンピュータを使ってロボット工作とプログラミングを体験する学習教材。

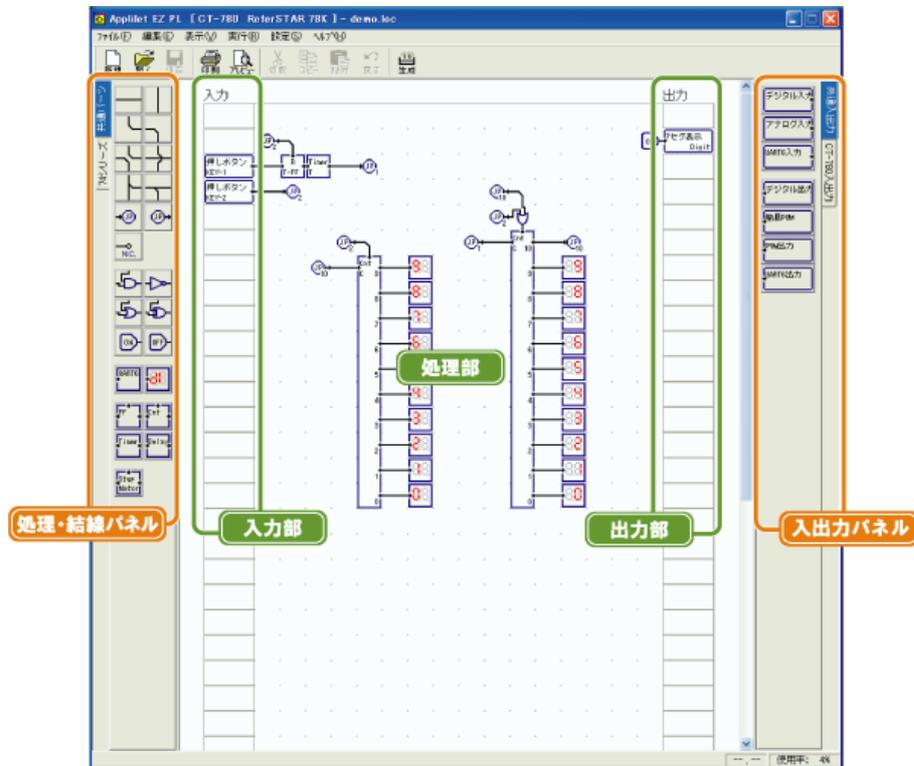


図 2.1: Applilet EZ PL (図は参考文献 [11] より引用)

2.2 関連技術

本節ではセンサネットワークを構成するセンサデバイスの一例である MOTE に関連した技術をまとめる。この MOTE は本研究で用いたセンサデバイスであり、提供するツール作成に Power TOSSIM を利用している。

2.2.1 MoteView

MoteView [14] は、Crossbow 社製のセンサデバイス MOTE において、構成されたセンサネットワークのモニター・記録や個々のセンサデバイスの設定ができるユーザ GUI ツールである。以下、図 2.2 及び図 2.3 にその画面を示す。図 2.2 はセンサネットワークを構成する各センサデバイスに対する設定を行う画面であり、図 2.3 は構成されたセンサネットワークの状態を監視している画面である。

この GUI ツールは、センサネットワークを構成する各センサデバイスの設定及

びセンサネットワークの監視を視覚化することにより操作を簡略化している。しかし、各センサデバイスの設定は、予め作成されたファームウェアの導入、もしくは、各種パラメータの設定のみで、省電力を意識した設定は従来と同様に開発者がパラメータの取舍選択を行う必要がある。

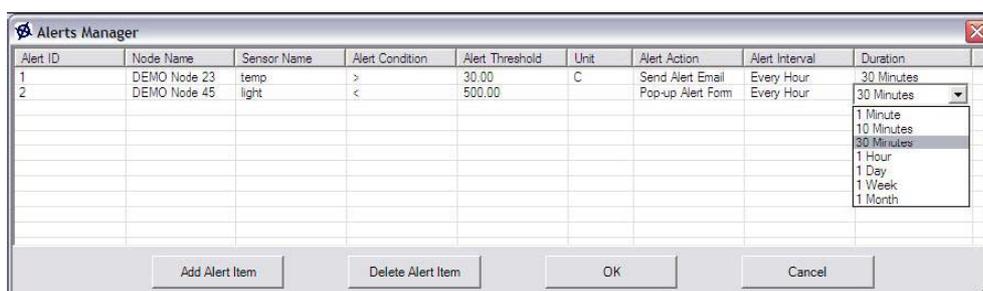


図 2.2: MOTE による設定画面 (図は参考文献 [14] より引用)

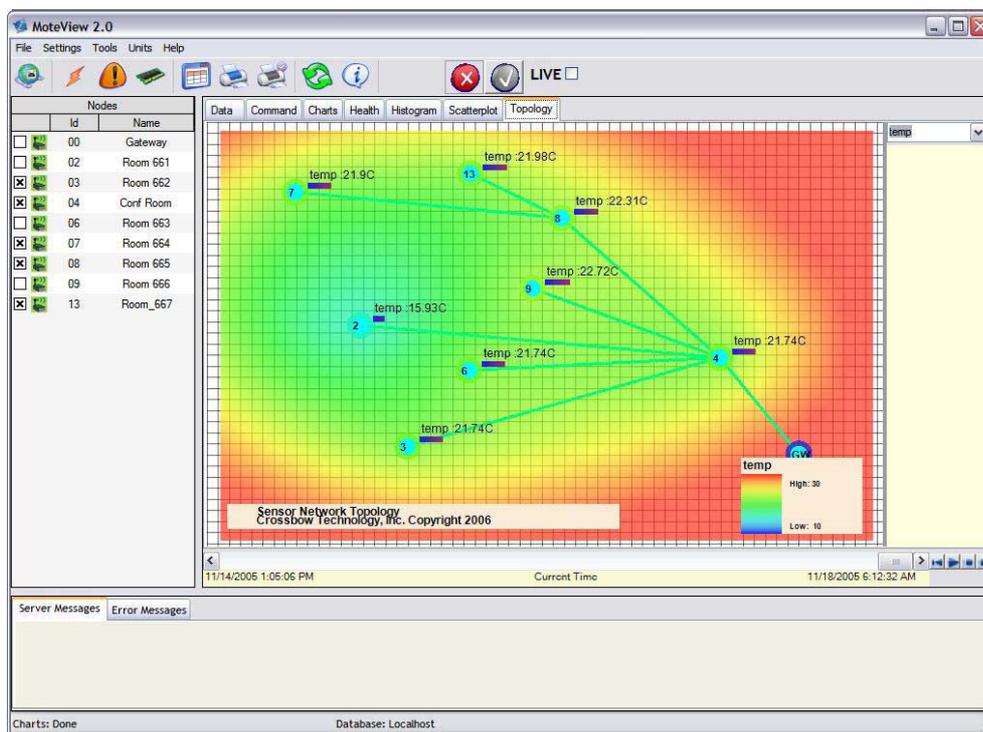


図 2.3: MOTE による監視画面 (図は参考文献 [14] より引用)

2.2.2 TOSSIM

Crossbow 社製 MOTE を対象とし、センサネットワークを構成する各センサデバイスそれぞれの振る舞いを忠実に再現するシミュレーション環境として、TOSSIM [15] がある。これは、UC Berkeley で開発されたシミュレーション環境であり、Scalability(スケーラビリティ)、Completeness(完全性)、Fidelity(忠実性)、Bridging(橋渡し) という4つのキー要素に基づき、各センサデバイスに発生するイベントを捉え、その相互作用をキャプチャするようにアーキテクチャで再現したものである。

MOTE を駆動させる OS である TinyOS の一つのアプリケーションとして提供され、ユーザが作成した駆動ファームウェアのシミュレーション環境として利用されている。

シミュレーション環境として、各センサデバイスの消費電流量に関しては未対応である。ただし、各センサデバイスに発生したイベントの情報を持っているため、その情報を用いた開発を行うことは可能となっている。

2.2.3 Power TOSSIM

イベント駆動型シミュレーション環境である TOSSIM の拡張として、Power TOSSIM [7] がある。

これは、TOSSIM において各センサデバイスの動作をイベントとしてトレースしていることを利用し、そのトレース結果と予め測定された各イベントごとの消費電流量とをあわせることにより、各センサデバイスにおける消費電流量を算出することが可能となったシミュレーション環境である。シミュレーションを行う際、センサデバイスの種類に対応した消費電力量を算出するパワーモデル、無線通信の設定を行う無線モデル、及びセンサデバイスの配置位置等の様々な設定が可能となっている。

そして、この PowerTOSSIM はデフォルト状態では、センサデバイスとして Cross-

bow 社製 Mica2MOTE を対象とし、当該 MOTE の Power model を予め作成している。しかし、対応した Power model を作成することにより他のセンサデバイスへの対応も可能となっている。

また、この Power TOSSIM のシミュレーション環境は、シミュレーションにおけるオーバーヘッドも少なく、有用であるが、実際のセンサデバイスにおける消費電流量を考えた場合、実情とは多少離れた結果となってしまう。なぜならば、消費電流量の多くを占めるセンサにおけるセンシングの際の消費電流量が考慮されていないためである。

なお、本研究では、ツールを作成する際の設定したパラメータ毎に対応した消費電流量を得るための手法として、この Power TOSSIM によるシミュレーション環境を用いている。センシングの際の消費電流量を考慮していない点については、センサデバイスに搭載されているセンサそれぞれの消費電流量を加算する処理を追加し解決している。

第 3 章

技術動向調査

本章では、センサネットワーク技術のうち省電力制御に関する技術の特許出願技術動向調査を用いた分析について述べる。分析した結果により、センサネットワーク技術の拡がりを実量的に示すこと、また、本研究で提案するツールの補助情報としての利用を実現する。

3.1 技術動向調査の概略

技術文献的性質を示す特許出願から得られる特許情報は、企業、大学等における研究開発の成果に係る技術情報や権利情報である。これを多面的に分析することにより、今後の技術戦略や出願戦略等のための有益な情報が得られる。特許庁では平成 11 年度からこの有益な情報を調査するために特許出願技術動向調査 [16] を実施している。

この特許出願技術動向調査は、国内外の特許情報や学術文献に基づく研究開発動向の情報を中心に総合的に分析を行うことにより、日本の技術競争力、産業競争力の状況を取りまとめて、今後日本が取り組むべき課題と方向性を整理し、提言している（図 3.1）。

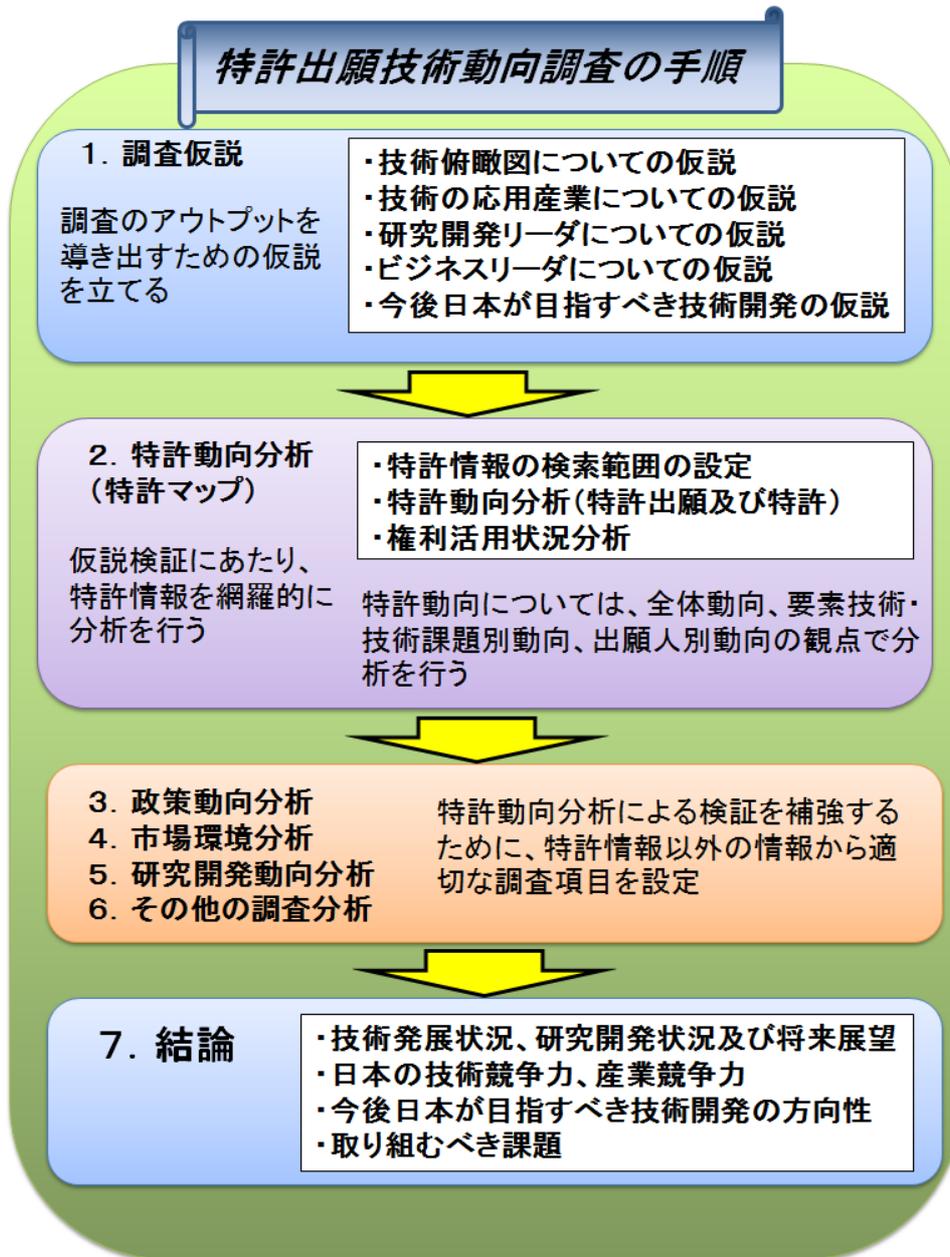


図 3.1: 技術動向調査の手法

3.2 センサネットワーク技術の技術動向調査

3.2.1 目的

センサネットワーク技術が適用されている具体的技術分野のうち省電力制御に関するものを調査することを目的として、特許出願技術動向調査の手法を用いた分析を行う。この調査により、センサネットワーク技術の拡がりを定量的に示すことが可能となり、本研究で提案するツールをより効率的に開発者が利用できるようになる。

本研究では、センサネットワーク技術の拡がりを定量的に示し、それが適用されている具体的技術分野を調査することを目的としているので、先に述べた特許出願技術動向調査のすべての手法を用いるのではなく、特許出願に基づいた特許動向分析のみを行うこととする。

3.2.2 調査範囲

特許出願は毎年約 40 万件前後あり、それらが文献として蓄積されており、その数は膨大なものとなっている。そのような特許文献を用い、センサネットワーク技術に関する特許出願技術動向調査を行うため、まずキーワードを用いた検索式により文献の絞り込みを行う。この絞り込みにより、今回の調査範囲に相当する文献の母集団が形成される。

本研究では、以下のキーワードによる検索式を用いてテキスト検索を行い、センサネットワーク技術における省電力に関連した技術の調査範囲を形成した。

- センサネットワーク*省電+センサネットワーク*節電+センサネットワーク*低電力+センサネットワーク*消費電力,3C, 減
- センサデバイス*ネットワーク*省電+センサデバイス*ネットワーク*節電+センサデバイス*ネットワーク*低電力+センサデバイス*ネットワーク*消費電力,3C, 減

ここで、検索式の中にある「,3C,」とは近傍検索の検索手法である。たとえば、「消費電力,3C,減」と検索を行った場合、「消費電力」「減」の順序は問わず、それらの間に3文字以内の文字が入った言葉を検索、抽出する。この場合、「消費電力を削減」「消費電力を減らす」「削減された消費電力」といった言葉が検索結果として得られる。つまり異なる言葉の表現方法を一括して検索するための手法である。

この検索式より得られた473件を調査範囲の母集団として、それ以降の分析を行った。

3.2.3 分析の方向性

検索式により得られた調査範囲の母集団を詳細に分析し、分類するために、以下の3つの分析軸を設定した。

- 技術分析軸
 - － ユーザステータス
 - － 省電力技術
- 適用分野
 - － 適用分野

分析軸を設定して分析を行う手法は、特許出願技術動向調査の手法である。分析軸の設定は、文献を分類するために設定されるものであり、解析を行う目的に応じた設定が行われる。そして分析は、各特許出願を精読し、対応する分析軸を付与し、付与された分析軸の数を集計することより行われる。

技術分析軸

技術分析軸は、出願人すなわちユーザのステータス（表3.1）、及び、省電力技術（表3.2）からなる。

ユーザのステータスの分析軸はセンサネットワーク技術がいかに広がっているのかを理解するためのものである。省電力技術の分析軸は省電力技術がいかなる具体的技術により実現しているのかを理解するためのものである。

そして、表 3.1 により、ユーザステータスに対する分析が、表 3.2 により、センサネットワーク技術における省電力に関する技術の詳細分析が可能となる。

表 3.1: 分析軸（ユーザステータス）

	国籍	所属
ユーザ	内国	企業
		研究機関等
	外国	企業
		研究機関等

表 3.2: 分析軸（省電力技術）

	大分類	具体的技術
省電力	装置	アンテナ
		基盤回路
		給電
		その他
	通信方式	稼働時間管理
		スケジューリング
		エリア管理
		ルート検索
		データ操作
		無線
		その他
	その他	その他

また、省電力に関する技術はそれぞれ以下に定義するように、省電力制御を実現する具体的手段に基づく。

- アンテナ
アンテナの配置、回路構成等を工夫したもの
- 基盤回路
回路配置、新規の IC 開発等を工夫したもの
- 給電
太陽電池等給電装置を備えたもの
- 稼働時間管理
装置のスリープ制御を実現したもの
- スケジューリング
装置のセンシング、通信等の順番を工夫したもの
- エリア管理
通信エリアを管理し、無駄な通信をなくしたもの
- ルート検索
効率的な通信ルートを選択するもの
- データ操作
データ集約等通信するデータ自体を工夫したもの
- 無線
装置の同期等無線に関して工夫したもの
- その他
装置、通信方式のその他の点を工夫、もしくは、それ以外を工夫したもの

適用分野分析軸

適用分野分析軸は、提供する情報、サービスに基づく分類により、その対象を具体化する分析軸である（表 3.3）。

この提供する情報、サービスに基づく分類とは、ネットワークを通じて、センサから得られた多様な情報を収集し、「動作」「環境」を的確に把握することで、ユーザニーズに即した情報提供、サービス提供が可能となるという考えから対象を具体化し、分類したものである。

表 3.3: 適用分野分析軸（情報、サービスによる分類）

分類	具体的適用分野
業務	自動検針（電気、ガス、水道） 農作物育成環境最適化 物流管理
施設管理	エネルギー需要最適化（室温管理） 構造物管理（損傷/劣化の把握）
環境	環境モニタリング 地球観測
保健、医療、 福祉	見守り（徘徊時安否確認） リアルタイムモニタリング（生体管理） コミュニケーション
交通	交通制御（渋滞解消、駐車場提供） 事故回避
安全、防災	ホームセキュリティ（火災、防犯） 被災状況把握

3.2.4 分析結果データとその考察

本節では技術文献的性質を示す特許出願を特許出願技術動向調査の調査手法を用いて詳細に分析した結果から得られた分析結果データを示し、それらに考察を加える。

出願件数の推移

図 3.2 は、センサネットワーク技術全体及びその中で省電力に関連した技術の出願件数の推移を出願年ごとに表したものである。

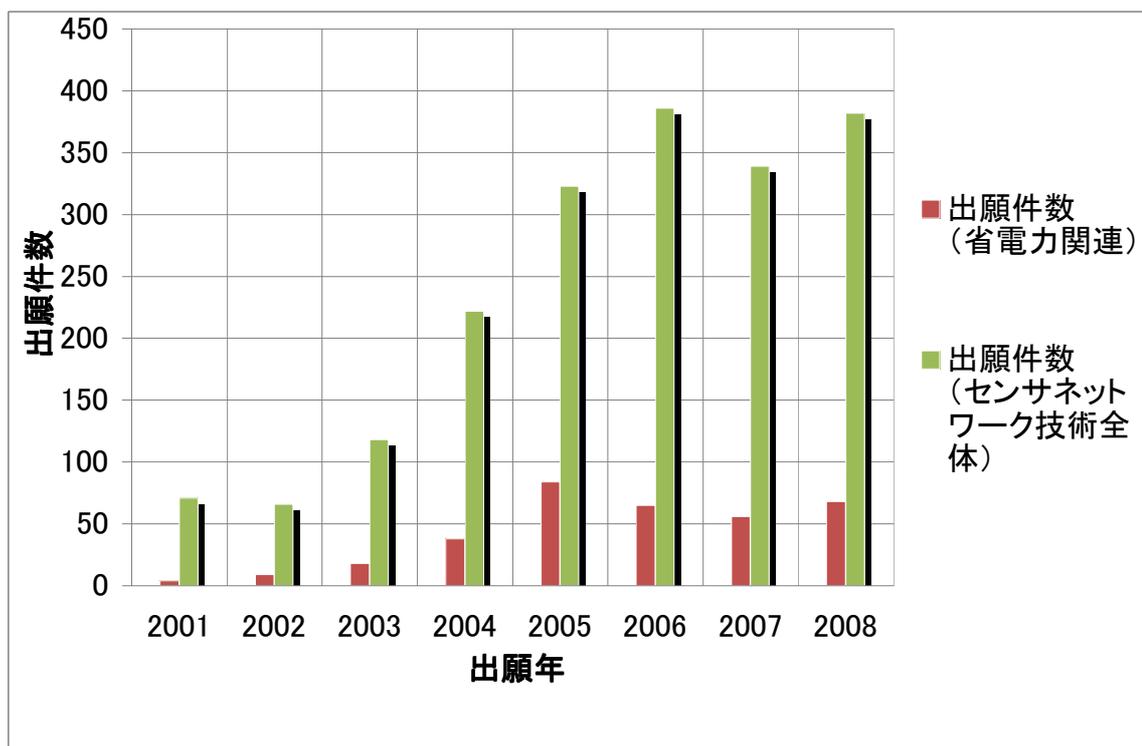


図 3.2: 出願年別出願件数

センサネットワーク技術全体の出願件数は2001年から2008年の8年間に約7倍にその数を増やし、センサネットワーク技術が注目され、多くの研究開発が行われていることがわかる。それにあわせて、同様に省電力に関連した技術も出願件数を増やしていることがわかる。つまり、省電力に関連した技術を含めたセンサネットワーク技術の研究の重要性が増していることが定量的にわかる。

ユーザステータス別省電力関連技術出願件数

図 3.3 は、センサネットワーク技術のうち、省電力に関連した技術の出願件数をユーザステータスである出願人の国籍別に出願年毎にその推移を表したものである。

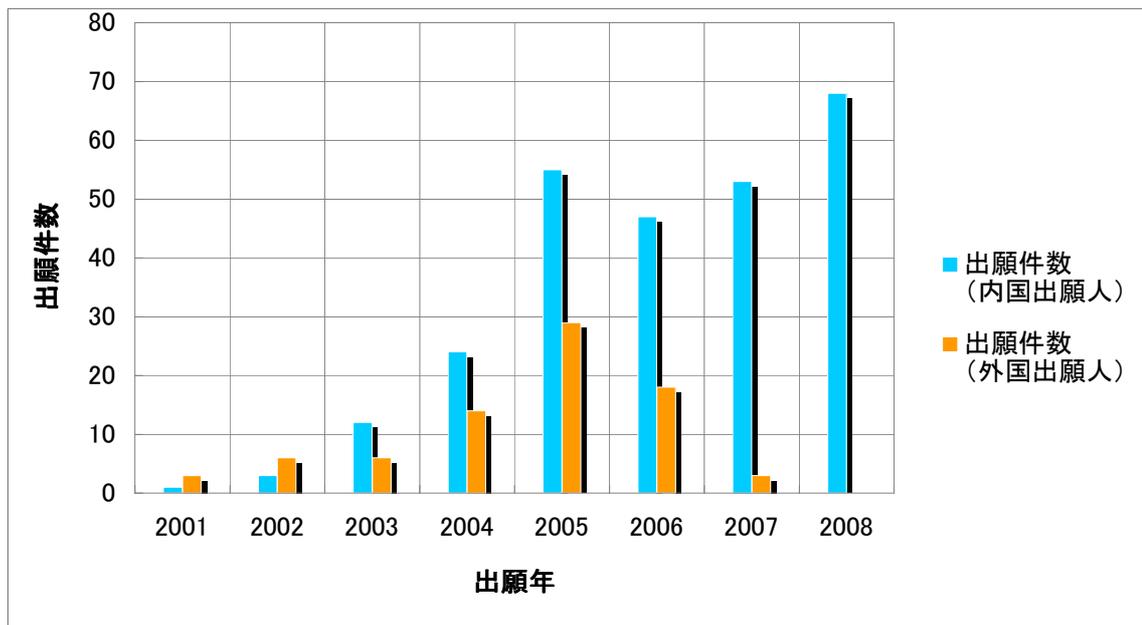


図 3.3: 出願年別出願件数 (省電力制御関連)

分析の対象とした調査範囲が日本へ行われた特許出願であるため、国籍別に見た場合、日本国籍を表す内国の割合が多くなっている。そして、内国、外国ともに出願件数は伸びており省電力に関連した技術が様々な面で研究開発されていることがわかる。

なお、2007年及び2008年の外国の件数は、優先権主張に伴う特許出願といった特許出願構造の特殊性ゆえにその件数が現在は少なくなっている。今後その件数は変動すると考えられる。

また、図 3.4 は、2001年から2008年に行われた特許出願をユーザステータスである出願人の所属別にその割合を示したものである。

特許権という独占権が付与される特許出願という特殊性ゆえにその割合は一般的

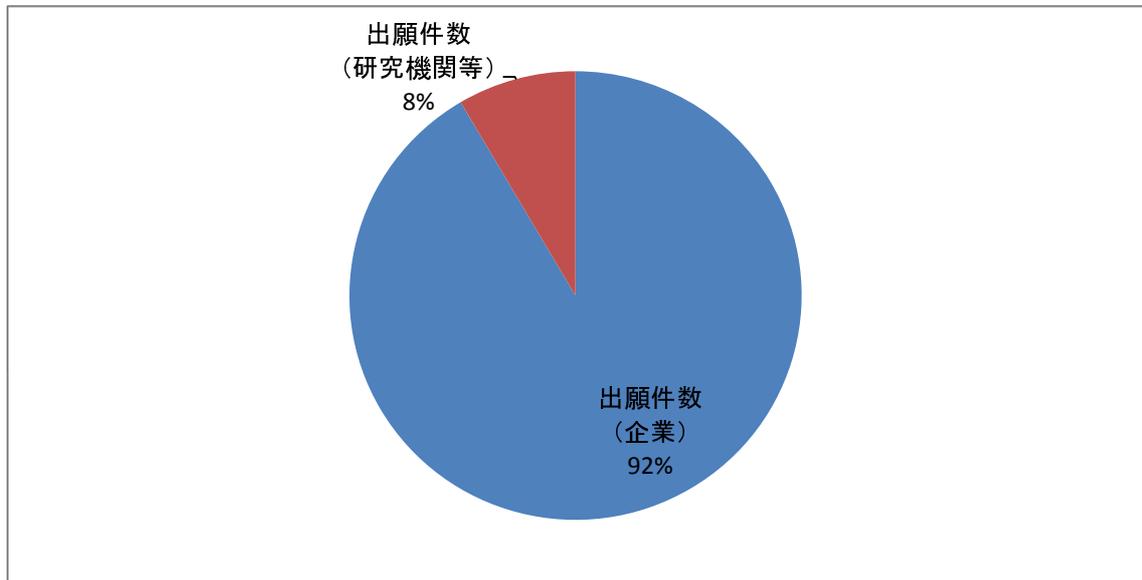


図 3.4: 出願人別出願割合

に企業がほとんどを占める。実際、2008年度の統計によると、企業の出願95.5%に対して、研究機関等による出願は4.5%である[17]。しかし、センサネットワーク技術のうち省電力に関連した技術は、大学等研究機関による出願が8%と高く、研究開発が活発に行われていることがわかる。つまり、センサネットワーク技術のうち省電力に関連した技術の研究が様々な場所で研究が行われており、その重要性が高いことが定量的に理解できる。

省電力技術の推移

図 3.5 及び図 3.6 は、センサネットワーク技術における省電力に関連した技術の出願件数の推移である。図 3.5 は、装置・通信方式・その他といった大まかな分類に基づく推移を示し、図 3.6 は、装置及び通信方式でいかなる技術が省電力を実現する技術が用いられているのか詳細に分析している。図 3.6 は、バブル図と呼ばれる図であり、そのバブルの大きさが大きいほど数値が大きい、すなわち、件数が多く、適用事例が多いことを示す。

図 3.5 からわかるように、省電力の実現は、装置の工夫よりも通信方式の工夫により行うことへの開発が多い。特に、図 3.6 から稼働時間管理による省電力の実現

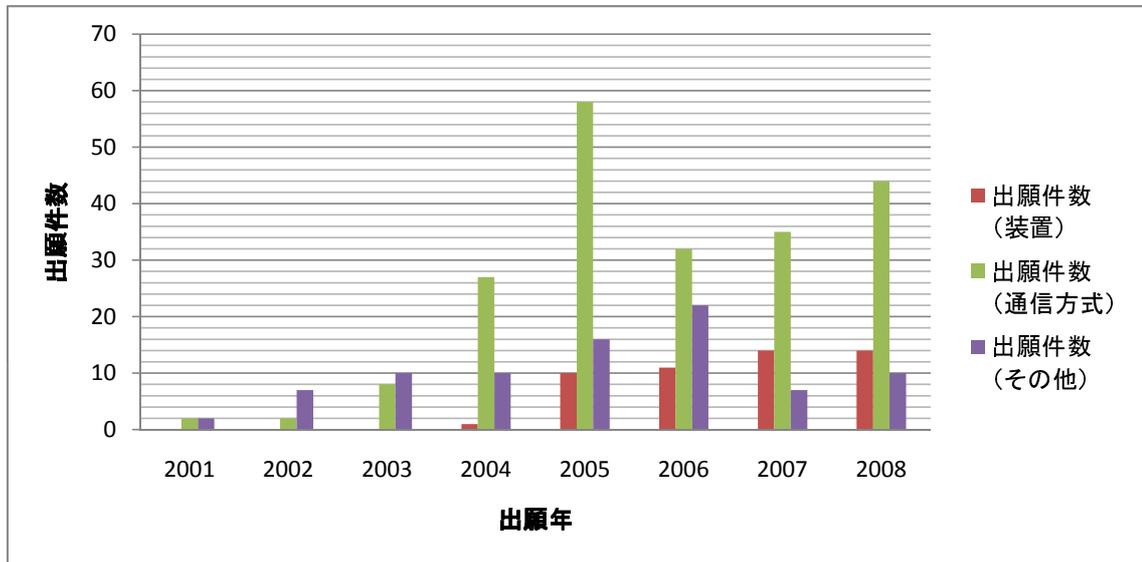


図 3.5: 省電力技術の推移

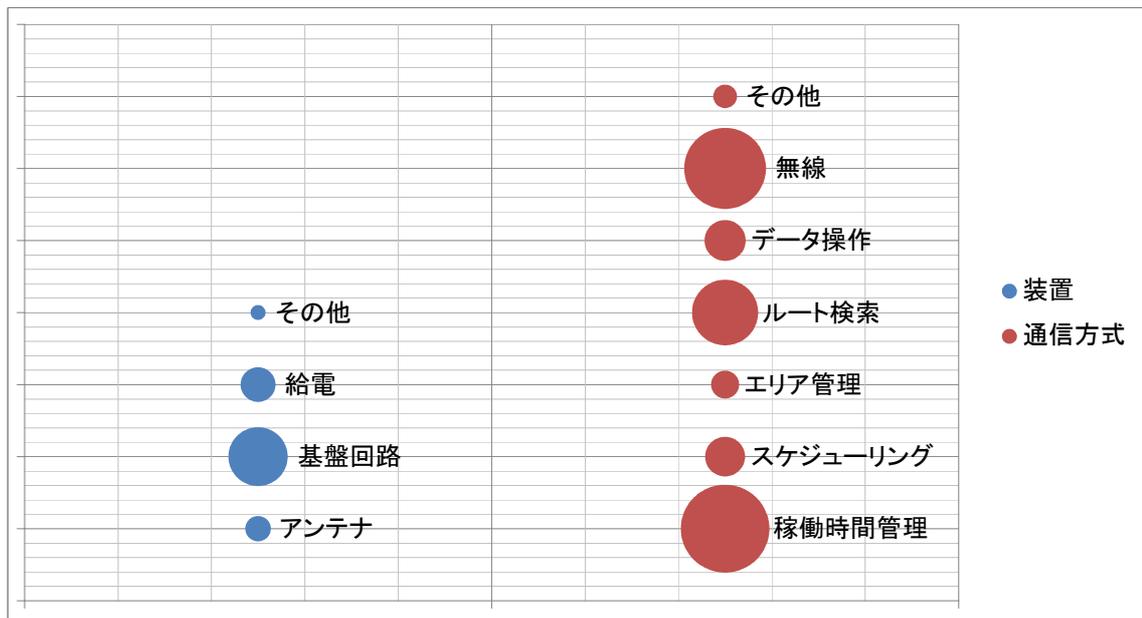


図 3.6: 省電力技術の詳細

が多い。これは、センサデバイスをスリープ制御することで、直接的に電力消費をなくし、消費量の削減が多く期待される制御である。そのため多くの研究開発が行われているためであると考えられる。

適用分野数の推移

図 3.7 及び図 3.8 は、それぞれ適用分野の分類ごとの出願件数の推移、及び、具体的適用分野ごとの 2001 年から 2008 年までの出願件数の傾向を示すものである。

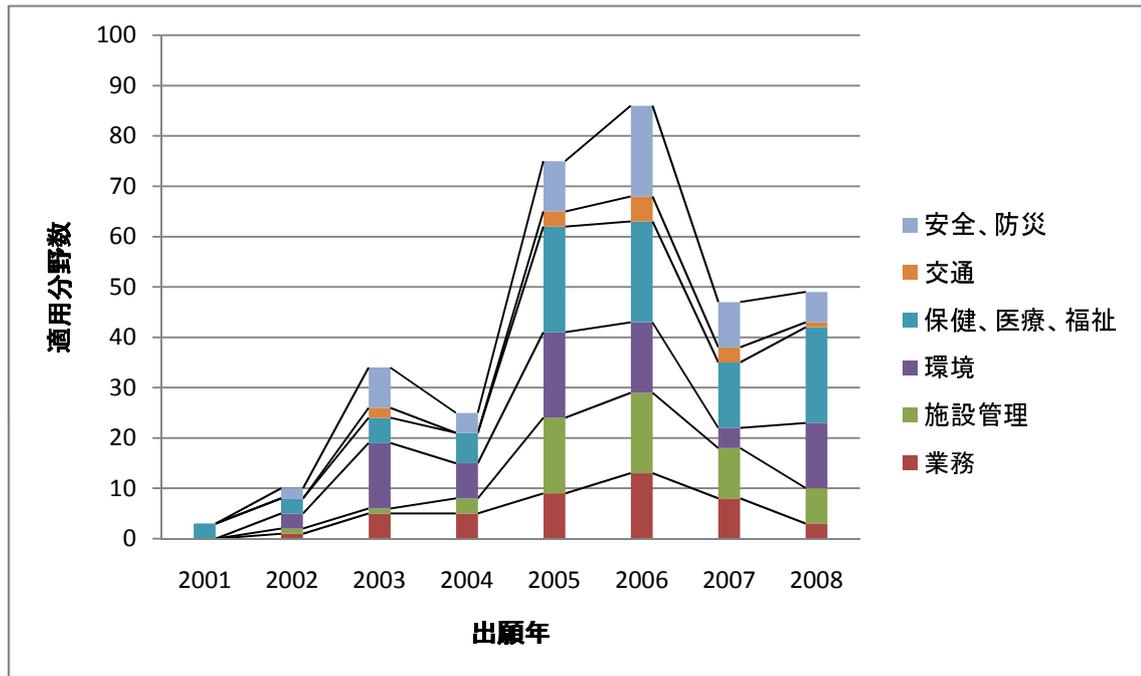


図 3.7: 適用分野数の推移

適用される分類としては、保健・医療・福祉の分類への適用が多く、その中でも、リアルタイムモニタリング、コミュニケーションへの適用が多いことが図 3.7 及び図 3.8 からわかる。その他、物流管理、構造物管理、環境モニタリング、セキュリティといった分野への適用が多く、様々な分野への適用が検討されていることがわかる。

このように様々な分野への適用が検討されていることから、センサネットワーク技術の利用機会は多くなってきていると考えられる。その場合、様々な分野のシステムを開発することが必要となる。

したがって、様々な分野の適用事例に対応した本研究の提供するツールを用いることはシステム開発者の負担を軽減することとなる。

また、特許出願を精読し、具体的適用分野に関する分析を行った結果からより詳

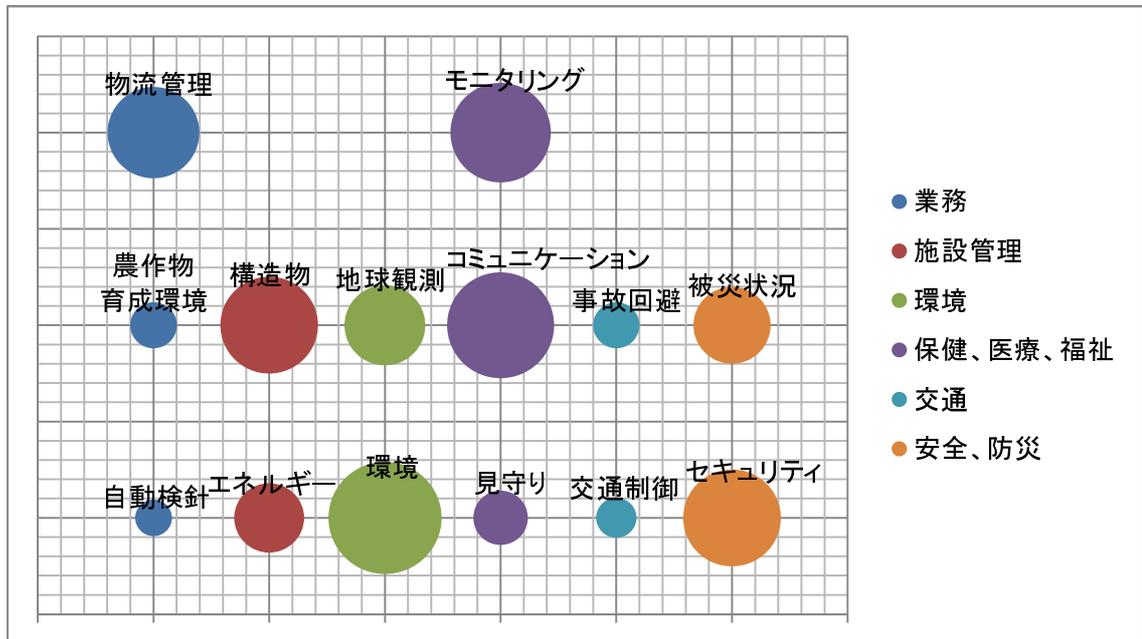


図 3.8: 適用分野の詳細

細な情報も得られた。それは、記載されている具体的事例等からセンサネットワークの規模がいかなるものであるのかについてである。以下、表 3.4 に示す。また、ここから得られた情報は、分野それぞれの具体的内容を用いた入力補助手段を本研究の提供するツールに組みこむ際に利用する。

ここで示す規模等は事例における代表的な数値であり、センシング間隔とは、センシングによりデータを取得すべき間隔を指すものとする。

表 3.4: 具体的適用事例の詳細

具体的適用分野	事例	配置間隔/配置数	センシング間隔
自動検針	住居のライフライン	5~10(m)/100 個程度	30 日
農作物育成環境最適化	大規模農場	100(m)/100 個程度	30 分
物流管理	販売商品管理	1(m)/1000 個程度	15 分
エネルギー需要最適化	冷暖房管理	3(m)/100 個程度	5 分
構造物管理	原子力発電所	1~10(m)/100 個程度	1 分
環境モニタリング	気象状況	50~100(m)/100 個程度	30 分
地球観測	大規模な気象状況	100~500(m)/1000 個程度	30 分
見守り	安否確認	10~50(m)/100 個程度	30 分
リアルタイムモニタリング	患者のバイタル情報	3(m)/50 個程度	1 秒
コミュニケーション	市中の監視	10(m)/100 個程度	15 秒
交通制御	渋滞状況監視	50~100(m)/100 個程度	1 分
事故回避	車間距離	10~50(m)/100 個程度	1 秒
ホームセキュリティ	不法侵入監視	5~10(m)/100 個程度	1 分
被災状況把握	災害地の状況把握	1~10(m)/100 個程度	10 分

3.2.5 分析結果のツールへの利用

本節では、得られた分析結果を本研究で提供するツールの作成に利用することについて述べる。

本研究で提供するツールは、前節で示した特許出願技術動向調査の結果を利用して作成されている。

- 利用範囲

分析結果から得られた具体的適用分野を本研究の提供するツールの利用範囲とする。適用が多い利用分野に対応させることは、システム開発者の利便性を向上させることになる。

- 入力補助手段

前節表 3.4 に示した具体的適用事例の詳細情報として得られた配置間隔、配置数、センシング間隔の情報をツール作成に利用する。この情報をツールで条件として設定されるパラメータの入力補助手段の作成に利用する。具体的には、「分類」の項目を選択すると、次に選択すべき「具体的適用分野」の選択が、前の選択内容に応じた内容のみ表示されるようになっている。以降すべての選択において適用されている (図 3.9)。

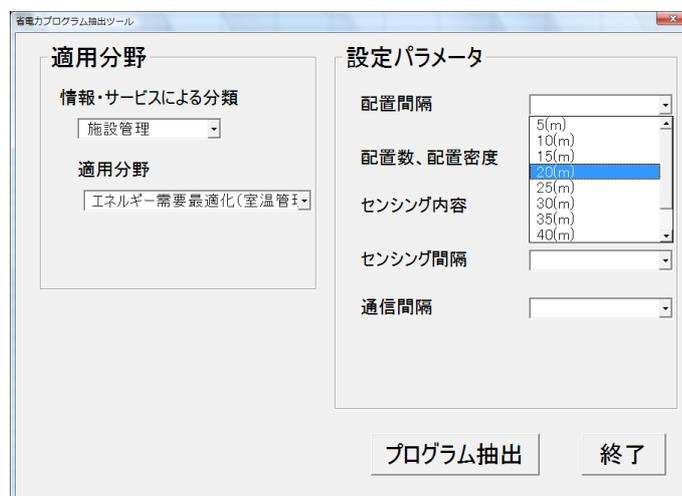


図 3.9: 分析結果のツールへの利用

第 4 章

センサネットワークと省電力制御

本章では、センサネットワークについての概要とネットワーク構築に用いられるセンサデバイスの一般的な機能、及び、本研究で用いた MOTE を含む既存のセンサデバイスを紹介し、それらの省電力制御についての説明を行う。

4.1 センサネットワークの概要

センサネットワークとは、センサを備えた複数のセンサデバイスがネットワークで結合され、それぞれ情報収集の役割を担うネットワークである。ネットワークの構築は、無線で自律的に相互通信を行うことで行われる。図 4.1 に示すように、任意の箇所にセンサデバイスを配置し、それぞれに備えられたセンサによる情報収集を行う。そして無線による相互通信を行うことにより各センサデバイスで得られたデータを収集・分析をする。このセンサネットワークは、遠隔地の情報をリアルタイムに取得できることから、防災・防犯・医療福祉・交通など様々な分野での活用が期待されており、ユビキタスネットワークの実現に必要不可欠な技術として注目されている。以下、表 4.1 にその利用例を示す。

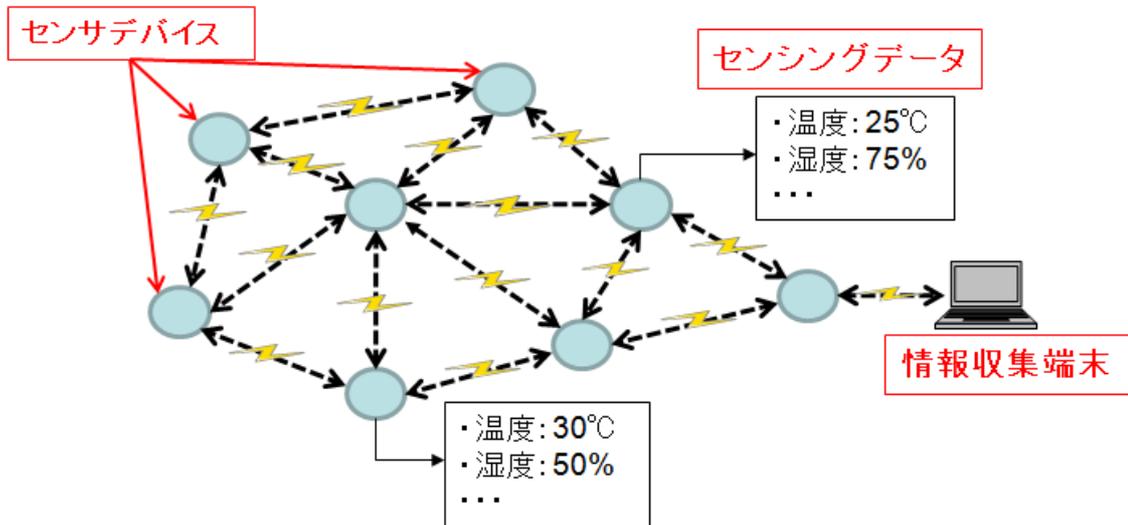


図 4.1: センサネットワーク

表 4.1: センサネットワークの利用例

利用用途の種類	利用例
人の健康管理	CFH (Center for Future Health) [19] 各人の健康状態情報を取得、収集するシステム
動物の生態管理	Great Duck Island [20] Great Duck 島の生態情報管理
物等の状態管理	Media Cup [21] コップの温度を感知し、冷める前に通知するシステム
環境の状況管理	Live E! [22] 「デジタル百葉箱」等による気象情報収集
人の行動管理	Smart Kindergarten [23] 幼稚園児の行動管理
軍事利用	Smart Dust [18] 体積約 100 立方ミリメートルの小型デバイス

4.2 センサネットワークとセンサ

4.2.1 センサネットワーク

センサネットワークは複数のセンサデバイスにより構成されるネットワークで、それらの物理的な接続構成は大きく分けて二種類ある。一つ目は有線を用いてセンサデバイス間を接続したネットワークであり、主に家やビルなどの建造物で利用される。二つ目は無線技術を用いてセンサデバイス間の通信を可能にするネットワークであり、有線での設置が困難な場所で利用され、広範囲での利用が可能である。無線で通信するセンサネットワークを特にワイヤレスセンサネットワークと呼ぶ。センサネットワークの利用状況に応じてそれぞれの接続構成が用いられる。それぞれの接続構成におけるセンサネットワークの利点と欠点を表 4.2 に示す。

表 4.2: センサネットワークの接続構成ごとの利点と欠点

接続構成	利点	欠点
有線接続	安定した通信	配線が困難、センサデバイス位置固定
無線通信	配線不要、センサデバイス移動可能	電力供給問題、無線ノイズ影響大

本研究では、無線通信によるセンサネットワークの欠点である電力供給問題を解決するためのツール提供を行う。

4.2.2 センサ

センサデバイスは、情報収集を行うために各種センサを備える機器である。

センサは実世界において各種の情報を計測するハードウェアデバイスである。計測結果はデジタル数値に変換される。計測する対象の化学物質やエネルギーの名称をセンシングデータの種類と呼び、センサが変換した数値をセンシングデータと

呼ぶ。センサは設計限度により全ての変化を計測することはできないため、計測できる値は特定の値域内に制限される。そして、測定されるセンシングデータの値域と精度はそのセンサの特性によって定まる。

また、センシングデータの種類はセンサが感知する対象によって異なるため、多様な種類が存在する。表 4.3 にセンサの感知対象におけるセンシングデータの種類を示す。一般感知センサは室内や構内などの空間を計測するために、物や壁に設置して利用する。また、バイタルセンサは人の状態を計測することが目的であり、人が持ち運んで利用する場合がある。他にも、有毒ガスが発生しているかなどを感知するため、または、政策や産業利用といった特殊な目的のために利用するセンサがある。

表 4.3: センサの種類

センシング対象	センシングデータの種類
一般感知センサ	温度、湿度、照度、圧力、加速度、方位、位置、人感 など
バイタルセンサ	体温、血圧、脈拍、心拍数、血糖値、心電 など
その他センサ	有毒ガス、金属探知 など

4.3 センサデバイスの要件

センサネットワークの構築には、多くのセンサデバイスを広範囲に、かつ、あらゆる場所に配置する必要がある。そのため、用いられる各センサデバイスは以下の要件を満たす必要がある [1]。

- 自律制御機能を備えている

広範囲で膨大な数のセンサデバイスの設置を期待されているため、それらを集中管理によってデバイス制御やネットワーク構築を行うことは非常に困難になると考えられる。そこで、各センサデバイスの自律制御機能が必要となる。

- 形状が小型である

災害地等での活用や既存構造物への後からの設置を想定するとセンサデバイス自身の形状が設置場所を制限することは好ましくない。そのため、可能な限り小型化されることが求められる。

- 省電力制御が可能である

各センサデバイスを広範囲に配置することを想定した場合、コスト等現実的な問題から配線が困難であり、その駆動は電池駆動とする必要が生じる。そのため、各センサデバイスそれぞれでの省電力制御は欠かせない要素である。省電力制御については以下のように分類される。

- スリープ制御

センサデバイスは条件に基づき定期的にセンサにより取得されたデータを送信するものである。また、センサデバイスのセンシングを行う間隔等稼働条件によっては、他のセンサデバイスとの通信を常に行う必要は無い。そのため必要なときだけ間欠的に動作させることにより消費電力を削減する制御を行うことが可能となる。この様に、間欠動作を行うための制御をスリープ制御と言う。

－ 送信電力制御

各センサデバイス間のデータ送信時の互いの干渉を考慮して、通信を行う際の通信時送信電力や伝送速度を適切に設定することで省電力制御を行うことが可能となる。この制御を送信電力制御と言う。

－ クロック制御

通常、各センサデバイスに組み込まれている CPU のクロック数は最大データ処理量に応じて設定される。しかし、処理量はセンサデバイス間のデータ通信量などによって大きく上下する。そのため、各センサデバイスのデータ処理量に応じてクロック数を変化させることで省電力制御が可能となる。これは、動作クロックを下げると処理能力は下がるがそれに伴い、消費電力も下がるという特性を利用している。この制御をクロック制御と言う。

また、センサネットワークに用いられる無線通信には以下の様な要件が必要となる。

● 長期間での運用を視野に入れた省電力性

無線通信自体における電力消費を最小限に抑え、長期間の運用を可能にする。

● ネットワークへのセンサデバイスの追加を自由に行える拡張性

センサネットワークでは各センサデバイス同士がマルチホップ通信を行い、データを中継して届けることで広範囲なネットワーク構築を可能にする。そこで将来的にセンサデバイスの追加を行った際の処理を最小限に抑え、容易なネットワーク拡張を可能にする。

● ユーザ・ネットワーク間の双方向通信

ユーザにデータを提供するのみではなく、ユーザからネットワークのセンサデバイスに対してパラメータを変更できるような双方向通信を可能にする。

4.4 既存のセンサデバイス

前節で述べた通り、センサデバイスにはセンシングを行うセンサ機能のほかに、様々な機能を実装する必要がある。これらの機能を満たし、かつ、独自の機能を持つセンサデバイスの開発が多くの大学や研究機関において行われている [24]。

- MICA MOTE

MOTE は米カリフォルニア大学バークレー校が発端となり国際フォーラムで開発されているシステムで、最も早く市販され、広く普及しているセンサノードである [6]。

本研究ではセンサネットワークを構成するセンサデバイスとして、このMOTEを用いており、詳細な説明は次節で行う。

- i-Bean

i-Bean は MillennialNet 社により提供されているセンサデバイスである。ネットワーク上でノードに対してエンドポイント、リピータ、ゲートウェイと役割分担されていることが大きな特徴である [25]。その特長を生かし、各ノードがセンサによるデータ取得や通信など全ての動作を行うタイプのネットワークに比べて消費電力の減少に成功している。しかし、通信の中継機器であるリピータノードが故障するとセンサデータを送り届けることができなくなるためネットワークの堅牢性は低い。

- Pushpin Computing

Pushpin Computing は米マサチューセッツ工科大学メディアラボの研究プロジェクトであり、汎用の高密度センサネットワークの実験プラットフォームの構築を目的としている [26]。最も特徴的な点として、電源供給を電池ではなく、導体と絶縁体を層状に重ねた壁にピンを刺して行うことである。安定した電源供給が行われる事で高速な通信モジュールや高速処理プロセッサを

用いることが可能で、様々な機能を持つデバイスの作成を実現している。

- SensorWeb

SensorWeb は米 NASA のジェット推進研究所の研究プロジェクトであり、宇宙、海中、砂漠などの過酷な環境における環境変化の測定を目的として開発されている [27]。センサネットワークを用いた分散型のシステムをどのように構築するかに主眼が置かれている。

4.5 MICA MOTE

4.5.1 基本仕様

MOTE は、任意のセンサ基盤を無線端末に搭載することによりその機能を果たすことが可能となる (図 4.2、図 4.3) [28]。この MOTE を開発した「Smart Dust」プロジェクトは米国防総省高等研究計画局 (DARPA) の研究プロジェクトにも採択されており、体積 1.5mm^3 以下、重さ 1.5mg 以下のサイズでセンサネットワークの構築に必要な処理機能を実装させるセンサデバイスの開発を目標に、現在も研究が続けられている。また、通信規格として、868/916MHz マルチチャンネル無線もしくは近距離かつ低レート通信規格である 2.4G 帯 IEEE802.15.4 を採用している。

さらに MOTE は、小型機器制御用に開発された OS である「TinyOS」を搭載している。TinyOS は、限られた資源下で効率的かつ低電力に動作することが可能となるように設計されており、センサデバイスとの相性が非常に良く、MOTE の各大学や研究機関への普及の面で大きく貢献している。また主な特徴として、イベント駆動型の同時実行制御とモジュール方式を実現している。

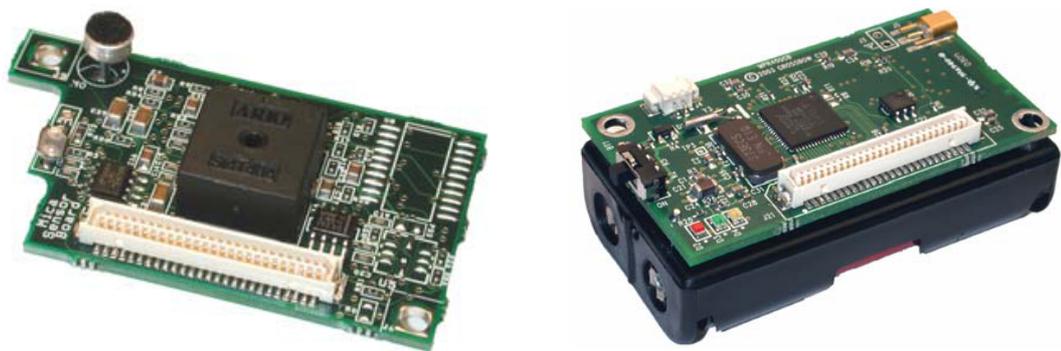


図 4.2: センサ基盤 (Crossbow MTS300) 図 4.3: 無線端末 (Crossbow MICA2) (図は参考文献 [28] より引用) (図は参考文献 [28] より引用)

4.5.2 TinyOS と制御プログラム

TinyOS は、ワイヤレスセンサネットワークのために設計されたオープンソースのオペレーティングシステムである。センサネットワークを構成するセンサデバイスにおける厳しいメモリ制限のために要求されるコードサイズの最小化を可能とし、コンポーネントベースのアーキテクチャとして実装されている。また、ネットワークプロトコル、分散型サービス、センサデバイス、データ収集のための各種ツールをコンポーネントライブラリとして備えている [29]。

TinyOS は NesC と呼ばれる C 言語ベースの言語で記述されている。ユーザが必要とする機能をモジュール化し、コンポーネントと呼ばれるモジュール同士をコンポーネントが提供する機能であるインタフェースにより結合することにより制御プログラムが形成される。

実際のセンサデバイスのセンサによるセンシングデータのサンプリング過程の概念図を図 4.4 に示す。図 4.4 は、タイマーである「TimerC」、サンプリングを行う本体である「SamplerM」等センシングデータのサンプリングを実現するためのコンポーネントすべての関係を示している。本研究で提供するツール作成するにあたり省電力を実現する箇所はその一部「XSensor」である。制御プログラムにおいて、「XSensor」からの `getSample` 呼出しを改変することによりセンサによるセンシングデータの収集を変化させることが可能となる。

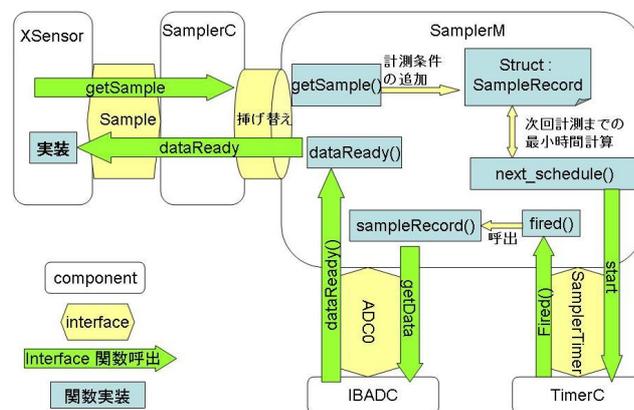


図 4.4: サンプリング過程の概念図

4.6 センサデバイスの省電力制御

4.6.1 電力供給問題解決へのアプローチ

センサデバイスを現実的に長期間運用するためには、電力供給問題の解決が重要となっており、従来、以下の問題解決へのアプローチによる研究が進められている。

- ハードウェア的アプローチ
 - 蓄電池を含む小型の太陽電池を取り付けることにより電力を供給 (電力供給型)
 - センサデバイスを構成するハードウェア自体の省電力化 (消費電流削減型)
- ソフトウェア的アプローチ
 - センサデバイス自体の制御をソフトウェア的に工夫し、省電力制御を行うことによる消費電流量を削減 (消費電流削減型)
 - センサデバイスの環境に基づき、センサデバイスの配置方法、データ転送の際のプロトコルを工夫 (消費電流削減型)

そして、消費電流量を削減することを考えたソフトウェア的アプローチにおいて、センサデバイス自体の制御を工夫することを考えた場合、省電力制御を実現できる箇所 (パラメータ) は下記に示す箇所に限定される。それぞれの影響により消費電流量が変化し、センサデバイスの各機能が駆動されるイベントの発生回数が多い程、精度の良い通信、取得データ量の増大が可能となるが消費電流量が多くなることは明らかである [4]。

- センシング

- 間隔変更
センシング回数の増減に影響
- 情報集約
センシングデータを送信する回数に影響
- 通信
 - 間隔変更
通信回数の増減に影響
 - ルート変更
マルチホップ通信を行った際のホップ数に影響
 - 送信出力変更
無線送信の際の送信出力の大きさに影響
 - データ圧縮
通信量の変化により通信時間に影響
 - 時刻同期
時刻同期を行う頻度が消費電流量に影響
- 演算処理
 - クロック変更
プロセッサ駆動の際の消費電流量に影響
- 記憶
 - データ蓄積量
センシングデータの蓄積量、通信回数の増減に影響

これらのパラメータを開発者が取捨選択、試行錯誤して調整することにより省電力制御が実現されるのである。

4.6.2 本研究におけるアプローチ

本研究では、以下に示す2つのパラメータに着目してソフトウェア的な工夫により消費電流量を削減し、省電力制御を実現することとした。

- センシング間隔
- 通信間隔

当該2つのパラメータのみに注目したのは以下の理由による。

- センサデバイスの消費電流量に関し、センサによるセンシングの際の消費電流量は非常に大きい[4]。そのため、センシング間隔により定められる所定時間当たりのセンシング回数は、所定時間当たりの消費電流量に多大なる影響を与える。
- センサデバイス自体のハードウェア構成から搭載されているメモリ量は一定であり、センシングにより得られたセンシングデータの蓄積量は制限される。そのため、データ蓄積量に依存して、通信間隔とセンシング間隔とは互いに影響を与える。
- 今回の研究で用いたセンサデバイスである MOTE の制御を考えた場合、その制御プログラムで制御可能なパラメータがセンシング間隔、通信間隔であった。

第 5 章

省電力制御プログラム作成支援ツール

本章では、本研究で提供するツールである省電力制御プログラム作成支援ツールの概要、実装について述べる。

5.1 概要

本論文で提案するツールは、センサデバイスの省電力制御を実現する最適な制御プログラムを簡単な設定のみで自動的に作成するものである。

制御プログラムは以下に示す 2 段階の手順により作成される。

1. 分類、具体的適用分野の設定
2. 配置間隔、配置数、センシング内容、センシング間隔、通信間隔の設定

なお、センシング間隔、通信間隔とは形成するセンサネットワークにおいて、ユーザが情報収集のために必要となる最長の間隔であり、その間隔より短い間隔でセンシング、通信が行われるのであれば必要なデータが取得可能である値を指す。

図 5.1、図 5.2 は、本研究で作成したツールの実際の画面であり、図 5.1 で設定を行うと、図 5.2 で示すように省電力性の高い上位 3 つのセンシング間隔、通信間隔を表示し、その中から選択した結果の制御プログラムを自動的に生成するように構成されている。

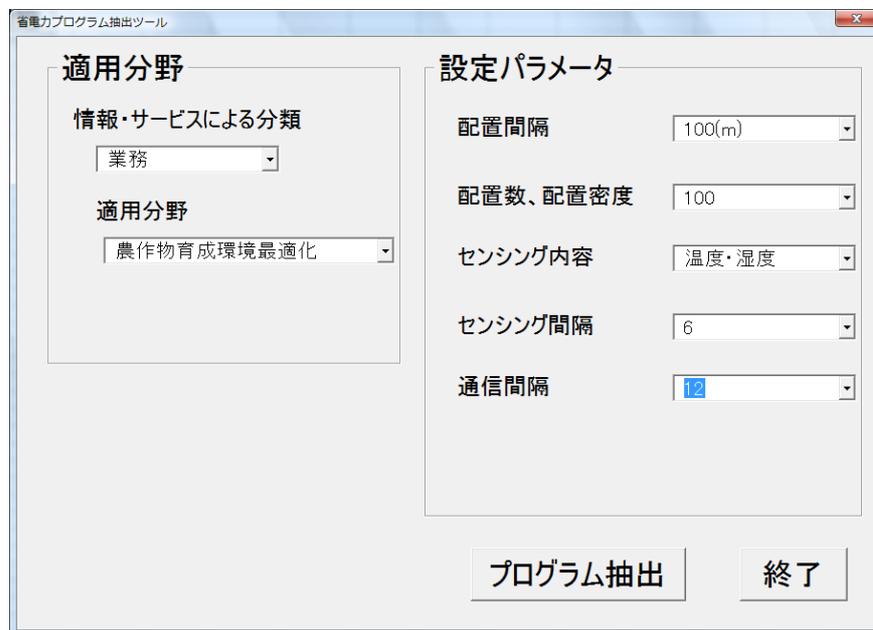


図 5.1: ツール設定画面

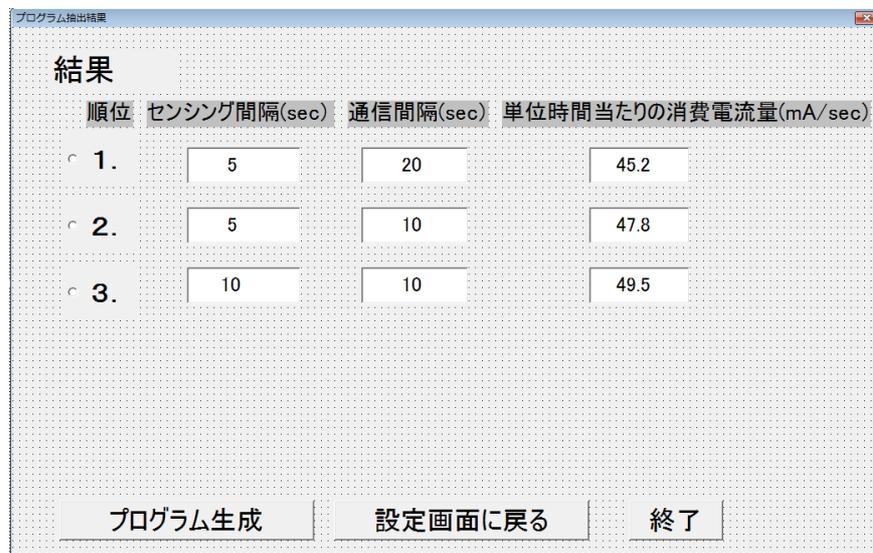


図 5.2: ツール結果画面

また、以下のような特徴を有する。

- 利用分野

特許出願技術動向調査の結果に基づき、ツールが利用できる分野を決定している。利用が多い分野の省電力制御プログラム作成を支援することは、システム開発者の利便性を向上させる。

- 単純操作

簡単な設定のみで自動的に制御プログラムを作成することが可能となっている。

- 入力補助

技術動向調査により得られた情報により、設定内容が選択的に表示される。具体的には、「分類」の項目を選択すると、次に選択すべき「具体的適用分野」の選択は、前の選択内容に応じた内容のみ表示されるようになっている。以降すべての選択において同様の仕組みが適用されている。

5.2 実装

5.2.1 実装の流れ

本論文で提供されるツールの実装は、以下に示す各工程により行われる。

1. 対象機材の選定、ベースとなる制御プログラムの作成

ツールにより制御プログラムを作成可能とするセンサデバイス等機材を選定する。あわせて選定されたセンサデバイスの制御プログラムを作成する。

2. 実験

作成された制御プログラムの省電力制御を実現するパラメータを調整し、シミュレーション環境 Power TOSSIM を用い、調整されたパラメータに対応したセンサデバイスの消費電流量を抽出する。これを繰り返し、様々な条件設定でのパラメータに対応した消費電流量の値をパラメータと対応させて蓄積する。また、得られた消費電流量に実際のセンシングの際のセンサにより消費される電流量を加算し、その値を最終的な消費電流量とする。これは、シミュレーション環境 Power TOSSIM が実際に搭載されているセンサによるセンシングの際の消費電流量を考慮していないためである。

実験の際、シミュレーション環境 Power TOSSIM を用いた場合、Power TOSSIM 自体が備える機能がゆえの問題が生じ、後で述べるような様々な制約条件が課される。しかし、この Power TOSSIM を用いず、実機による実験を行った場合、センサデバイスが置かれた温度等その環境は、毎回異なるものとなり、実験の均一性、再現性が担保されない。

したがって、シミュレーション環境 Power TOSSIM を用いた実験が最適である。

3. ツール本体の作成

実験により得られた消費電流量の値を用い、設定された条件から消費電流量

が少なく省電力性が高いセンシング間隔、通信間隔からなるパラメータを抽出する。それをベースとなる制御プログラムに組みこんだ制御プログラムを最終結果として出力するツールのインタフェースを作成する。

ツールは特許出願技術動向調査の結果を利用し、入力補助手段がインタフェースに作り込まれている。

5.2.2 実装環境

対象機材

ツール作成を行う実験の対象機材 (表 5.1、図 5.3、図 5.4) 及びそのスペック (表 5.2) を以下に示す。

表 5.1: 対象機材

センサデバイス	Crossbow Mica2MOTE
搭載センサボード	Crossbow MDA300

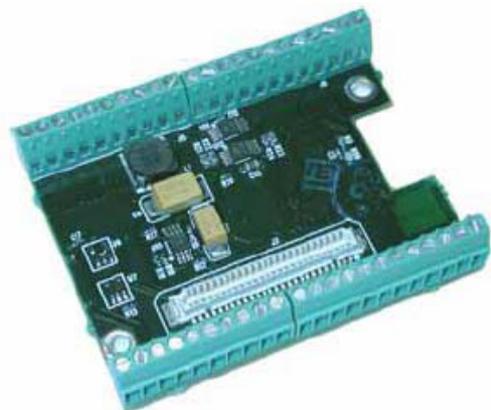


図 5.3: センサデバイス (Crossbow

Mica2MOTE) (図は参考文献 [28] より引用)

図 5.4: 搭載センサボード (Crossbow
MDA300) (図は参考文献 [28] より引用)

表 5.2: Mica2MOTE のスペック

CPU	ATmega128L
CPU speed	7.4(MHz)
Program Flash Memory	128(K bytes)
Measurement Flash	512(K bytes)
Radio Frequency	868/916(MHz)
Battery	AA x 2

そして、今回の実験ではセンサを搭載するセンサボードとして Crossbow 社製 MDA300 を用いた。これは、一般的な測定プラットフォームとして設計されたセンサが搭載されていないものである。そこで、センシングを行うセンサとして、Crossbow 社製のセンサデバイスでよく利用されている温度、光、音のセンシングを行うことが可能な各センサを用い、センサボード MDA300 に擬似的に搭載したものとして考えた。

各センサの具体的なスペックは下記の通りである (表 5.3)。

表 5.3: 搭載センサのスペック

センサ種類	名称	センシングごとの消費電流量
温度	Panasonic ERT-J1VR103J	1.0(mA)
光	Clairex CL94L	1.5(mA)
音	Panasonic WM-62A	0.5(mA)

また、選定されたセンサデバイス MDA300 の制御プログラムとして、Crossbow

社からオープンソースとして提供されている XSensorMDA300 を使用する。

実験マシン

シミュレーション環境 Power TOSSIM による実験に用いた計算機環境を表 5.4 に示す。

表 5.4: 実験に用いた計算機環境

OS	Microsoft Windows XP
CPU	Intel Core2 Duo 1.20GHz
搭載メモリ	3.0GB

5.2.3 前提条件及び制約条件

ツール作成のためシミュレーション環境 Power TOSSIM を用いた実験を行う際、以下に示す 2 つの前提条件、3 つの制約条件をつける。前提条件はシミュレーションをより現実的なものとするために必要である。また、制約条件が必要な理由は以下の 2 点である。

- 対象とするセンサデバイスとして Crossbow 社製 MOTE を用いるため調整可能なパラメータに制限がある。
- シミュレーション環境として Power TOSSIM を用いるためセンサのセンシングによる消費電流量は考慮されていない。多様なセンサデバイス配置に対応していない。

前提条件 1：省電力

センサネットワークにおける省電力とは、次の 2 つの状態がある。

- センサネットワーク全体としての省電力
- センサネットワークを構成する個々のセンサデバイスの省電力

本論文では、センサネットワークを構成するセンサデバイスのいずれか1つにでも電力の問題が生じた場合、各所における必要なデータを取得するというセンサネットワークの目的を達成することが困難となる環境を想定する。そのため後者、すなわち、センサネットワークを構成するセンサデバイス個々の省電力を実現すべき省電力とする。

そして、実験ではセンサネットワークを構成するすべてのセンサデバイスの消費電流量を求めるが、その中で最大となる、すなわち消費電流量が最も多いセンサデバイスの値を対応するパラメータにおける消費電流量の値とする。これは、そのセンサデバイスが最も早く電力を消費し、構成するセンサネットワーク全体に影響を与えるからである。

前提条件2：センシングデータ蓄積量

センシングデータを蓄積するセンサデバイスの Measurement Flash の大きさは有限であり、対象である Mica2MOTe においては 512Kbytes である。このメモリには、当該センサデバイスでセンシングされたデータが蓄積されるだけでなく、他のセンサデバイスから送信されてきたデータもあわせて蓄積される。そこで、本論文では grid 配置とした場合、他の2方向からのみデータが送信されくと仮定し、それらデータとメモリを共有するように、センシングデータの蓄積量を 512kbytes の1/3までと仮定する。このセンシングデータ蓄積量の制限により、通信間隔としてのパラメータに影響がある。

制約条件1：パラメータ

4.6節で示したように、センサデバイスの省電力制御を実現することが可能なパラメータは複数存在する。しかし、本論文では消費電流量に多大な影響を与える

と考えられ、対象センサデバイスである Crossbow 社製 MOTE で調整可能なパラメータであるセンシング間隔及び通信間隔のみを調整する対象とする。

制約条件 2: センサデバイス配置

実際の状況において、センサネットワークを構成するセンサデバイスの配置は多様である。しかし、多様なすべての配置におけるセンサデバイスの挙動をシミュレーションすることは不可能である。そこで、本論文ではセンサネットワークを構成するセンサデバイスの配置を grid 配置と仮定する。将来的には配置をパラメータとして設定するようにして多様な配置に対応させる。

制約条件 3: センサ消費電流量

シミュレーション環境 Power TOSSIM は、実際に搭載されているセンサによるセンシングの際の消費電流量を考慮していない。そこで、本論文ではシミュレーションにより得られた消費電流量に対して、センシング回数に応じたセンサ自体の消費電流量を加算して、最終的なツールに用いる消費電流量とする。

また、温度をセンシングするセンサの消費電流量は、センシングされる温度の変化量に比例する。しかし、本論文におけるシミュレーションでは、センシングされる温度の具体的な変化量を考慮することはできない。そのため現実に即した温度をセンシングするセンサの消費電流量を得ることはできない。そこで、本論文では、センシングされる温度の変化量は大きく変化せず、1回のセンシングあたりの変化量は1以内、すなわち1(/回)と仮定する。

5.2.4 実験

対象としたセンサデバイスを駆動する制御プログラムを用い、シミュレーション環境 Power TOSSIM により実験を行う。

実験の具体的方法を以下に示す。

1. 制御プログラム中のパラメータ変更

MDA300 の制御プログラム XSensorMDA300M.nc の中でセンシング間隔及び通信間隔に関するパラメータの箇所のプログラムを修正する。具体的には、下記に示すセンシング間隔の数値、データパケットの状態に応じた送信タイミングの値の変更を行う。また、それらに関連して、センシング間隔に対応したパケット形式となるようなセンシングされたデータの書き込み位置、送信タイミングに応じた送信時の挙動に関する箇所の修正もあわせて行う。

センシング間隔

```
#define ANALOG_SAMPLING_TIME 100
```

```
#define ANALOG_SAMPLING_TIME 1
```

送信条件

```
#define PACKET1_FULL 0x7F
```

```
#define PACKET1_FULL 0x1F
```

2. 修正された制御プログラムを用いたシミュレーション

修正された制御プログラムを用いたシミュレーションを行う。その際、センサネットワークを構成するセンサデバイスの grid 配置数 (1 辺の個数) 及び grid 間隔を設定しておく必要がある。

3. 消費電流量データの取得

設定したパラメータに対応した消費電流量の値が取得される。

5.2.5 予備実験

本論文では省電力制御を可能とするパラメータの中でセンシング間隔及び通信間隔を調整の対象とした。しかし、技術動向調査により得られた情報に対する具体

的適用分野のみを考えたとしても、実験ではそれらパラメータ調整だけではなく、センサネットワークを構成するセンサデバイスの配置数、シミュレーション時間等さまざまな値を変化させて行う必要があり、実験回数は非常に多くなる。

そこで、実験回数を減らすことを目的として、センサネットワークを構成するセンサデバイスの配置数、配置間隔及びシミュレーション時間の変化と求める消費電流量の値との関係を調べる。ここでは、センサネットワークを構成するセンサデバイスの配置数、配置間隔及びシミュレーション時間のみを変化させ、他の要素を一定とした実験を行った。その結果を表 5.5 に示す。

ただし、シミュレーション環境 Power TOSSIM のセンサデバイス配置数の上限が 1000 であるため、30x30grid 配置までとし、通信範囲が最大 30m であることを考慮して、配置間隔を 5m、20m とし、それぞれ実験を行った。また、比較のために表 5.5 中の消費電流量の値は、1 つのセンサデバイスにおける単位時間当たりの値 (mA/sec) とする。

表 5.5: 予備実験結果

		シミュレーション時間			
配置数	配置間隔	15(sec)	60(sec)	600(sec)	1800(sec)
2x2(4)	5(m)	38.9	43.3	45.5	45.5
	20(m)	36.1	44.9	45.5	45.5
5x5(25)	5(m)	45.1	45.5	45.6	42.5
	20(m)	45.3	45.4	46.7	47.1
10x10(100)	5(m)	44.5	42.3	43.5	46.8
	20(m)	45.5	44.8	39.2	43.2
30x30(900)	5(m)	44.4	42.0	40.5	42.7
	20(m)	45.0	41.1	47.5	41.0

表 5.5 からは次の点がわかる。

- 消費電流量は配置数には依存しない

センサデバイスの配置数が変化しても、影響を与えるセンサデバイスの消費電流量の値はほぼ一定である。これは、各センサデバイスはすべて同様にセンシングとデータ通信とを行うのみだからである。データ通信はある一定以上データが蓄積された場合に通信を行うパケット方式であり、grid 配置であるためにそれぞれのセンサデバイスがデータ通信を行う相手が一定となり、局所的にデータが集中することがないことによると考えられる。

- 消費電流量は配置間隔には依存しない

センサデバイスの配置間隔が変化しても、影響を与えるセンサデバイスの消費電流量の値はほぼ一定である。これは、センサデバイスの通信出力範囲に上限があり、その範囲を越えた通信は行われず、決まったセンサデバイスと通信を行うためであると考えられる。

- 消費電流量はシミュレーション時間には依存しない

シミュレーション時間が変化しても、影響を与えるセンサデバイスの消費電流量の値はほぼ一定である。これは、各センサデバイスはセンシングとデータ通信とを単純に繰り返すからであると考えられる。

これらの結果から、配置数及びシミュレーション時間を一定として実験を行うこととした (表 5.6)。

なお、配置数はある一定値を越えた場合、シミュレーション環境のためデータ書き込みの遅延が発生し、若干のオーバーヘッドが発生する [15]。また、シミュレーション時間についても配置数に応じてシミュレーションを行う計算機環境により、オーバーヘッドが発生する。これらの点を考慮しても配置数、シミュレーション時間を一定とできることは、変更すべきパラメータの数を減らすものであり、実験の効率化に寄与すると考える。

表 5.6: 実験で用いる配置数、シミュレーション時間

配置数	5x5(25grid 配置)
配置間隔	15(m)
シミュレーション時間	600(sec)

5.2.6 ツール本体の作成

ツール本体は、Microsoft 社製 Excel においてマクロを用いて作成した。

ツールは、実験により得られた各種パラメータとそれらに対応した消費電流量の値とを蓄積しておく。設定されたセンシング間隔、通信間隔からなるパラメータを条件として、センサデバイスの省電力制御を実現する最適な制御プログラムのパラメータを抽出する。そして、抽出されたパラメータを適用した制御プログラムを生成する。

ユーザであるシステム開発者が設定を行うインタフェースでは、技術動向調査により得られた情報により次に選択すべき情報は、先に選択された結果に基づいた表示が行われるようになっている。

5.3 ツールの利用方法

ツールの利用は、以下に示す3つのステップからなる。

- 条件設定

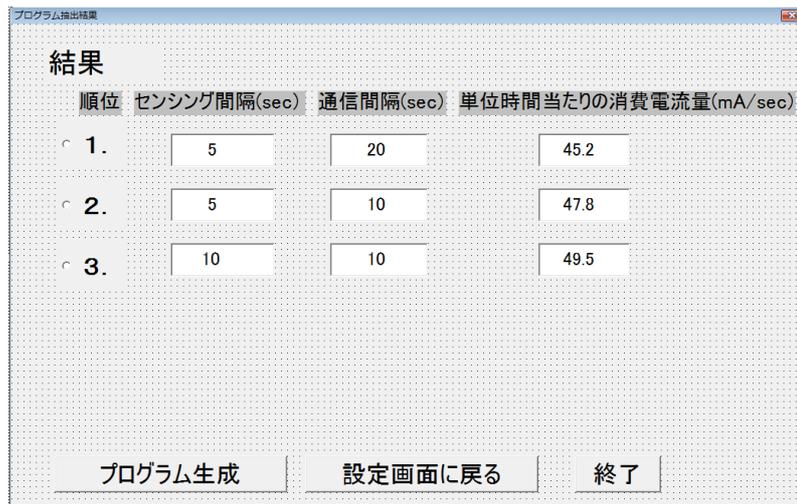
図 5.5 に示す画面で条件となる各種パラメータの設定を行う。

パラメータは必要なセンシングデータの取得が可能となる条件として設定する。設定された条件である「配置間隔」「配置数、配置密度」「センシング内容」は固定されたものとして扱われる。それに対して、「センシング間隔」「通信間隔」は、満たすべき最長の間隔条件を示す。たとえば、「センシング間隔」として 30(sec) が設定された場合、30(sec) ごとにセンシングが行われる必要がある。この場合、その間隔以内の間隔、たとえば 15(sec)、も省電力を実現する制御プログラム抽出の際の条件となる。また、パラメータの設定は、特許出願技術動向調査の結果を利用した入力補助手段により簡略化されている。先に選んだ選択項目の結果に応じて次に選ぶ選択項目の範囲が限定されている。

図 5.5: 条件設定画面

- 制御プログラム選択

設定された条件を満たし、省電力性の高い制御プログラムを3つ抽出した結果が得られる(図5.6)。この中から所望の1つを選択する。



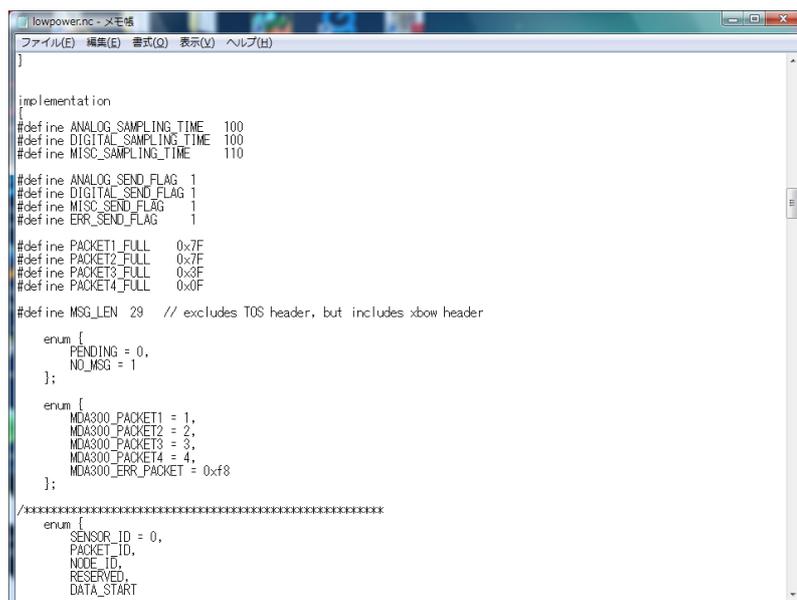
順位	センシング間隔(sec)	通信間隔(sec)	単位時間当たりの消費電流量(mA/sec)
<input type="radio"/> 1.	5	20	45.2
<input type="radio"/> 2.	5	10	47.8
<input type="radio"/> 3.	10	10	49.5

プログラム生成 設定画面に戻る 終了

図 5.6: 制御プログラム選択

- 制御プログラム生成

選択された制御プログラムが表示される(図5.7)。この制御プログラムを用いることにより省電力性の高いセンサデバイスの制御が実現される。



```
implementation
{
#define ANALOG_SAMPLING_TIME 100
#define DIGITAL_SAMPLING_TIME 100
#define MISC_SAMPLING_TIME 110

#define ANALOG_SEND_FLAG 1
#define DIGITAL_SEND_FLAG 1
#define MISC_SEND_FLAG 1
#define ERR_SEND_FLAG 1

#define PACKET1_FULL 0x7F
#define PACKET2_FULL 0x7F
#define PACKET3_FULL 0x3F
#define PACKET4_FULL 0x0F

#define MSG_LEN 29 // excludes TOS header, but includes xbow header

enum {
    PENDING = 0,
    NO_MSG = 1
};

enum {
    MDA300_PACKET1 = 1,
    MDA300_PACKET2 = 2,
    MDA300_PACKET3 = 3,
    MDA300_PACKET4 = 4,
    MDA300_ERR_PACKET = 0xf8
};

/*****
enum {
    SENSOR_ID = 0,
    PACKET_ID,
    NODE_ID,
    RESERVED,
    DATA_START
}*****/
```

図 5.7: 制御プログラム生成

第 6 章

評価と考察

センサネットワーク技術における省電力制御を実現する制御プログラム作成において、本論文で提案するツールを用いた場合と、従来システム開発者が行っていた手法を用いた場合とを比較し、ツールを用いた場合の利便性を示す。

以下の表 6.1 は、それぞれ制御プログラム作成に必要な工程を順に示したものであり、ツールを用いることによりシステム開発者がその労力を削減できる箇所を示したものである。ここで、表中に示された「 \square 」はツール開発者が制御プログラム作成に必要な工程を指し、「-」は不要な工程を指す。「 \square 」の数が多いほど必要な工程が多くなり、ツール開発者の労力負担が大きいこととなる。

表 6.1: 制御プログラム作成工程の比較

	ツール使用	従来
制御対象の選定	\square	\square
条件の設定	\square	\square
ベースとなる制御プログラム作成	\square	\square
省電力制御を実現するパラメータ調整	-	\square
シミュレーション、実機による検証	-	\square
実機への実装	\square	\square

この表 6.1 からわかるように、本論文が提案したツールを使用することにより、「省電力制御を実現するパラメータ調整」「シミュレーション、実機による検証」部分の工程が削減できる。これらの工程は、制御プログラムのうち調整可能な部分であるパラメータの値を最適な省電力制御が行われるように、試行錯誤して、最適な値となるまで複数回繰り返す必要がある。それに対して、本論文で提案されるツールを使用した場合、この工程においてシステム開発者はツール使用時にデータ取得が必要な間隔等条件設定を行うのみで省電力制御を実現する最適な制御プログラムを作成することが可能となる。これは、最適な値となるまで繰り返されるこの工程部分を予め行い、パラメータとしてツールに組みこんでおり、ツール作成の段階で労力を負担しているためであり、システム開発者がこの工程に労力をかける必要がなく、ベースとなる制御プログラムの改良等他の工程へ労力を振り分けることが可能となると考える。

また、本研究の提供するツールの作成においても労力の削減が可能となった。前節で行った予備実験の結果から実験を行う際の変更するパラメータ数を減らしたことは実験の効率化に寄与している。

本ツールを使うと、システム開発者がパラメータの条件を入力するだけで、制御プログラムが簡単に作成されるメリットがあるが、ツールの使用により生じるデメリットも存在する。

主なデメリットとしては、現実社会との乖離が考えられる。現状のツールでは前提条件、制約条件が厳しく、またツール作成で使用したシミュレーション環境 Power TOSSIM 自体が近似されたシミュレーション環境であることから、実際のセンサネットワークとは挙動がかけ離れている可能性がある。そのため、現実社会におけるすべての状況に的確に対応しているとは考えられず、ある程度の精度は有していると考えられるが、すべてを当てはめることができない。この点は今後解決すべきの課題と考える。

第 7 章

結論

7.1 まとめ

本論文では、センサネットワーク技術における省電力制御に関して、

- 技術動向調査によるセンサネットワーク技術における省電力制御の拡がりを定量的な提示、及び、具体的適用分野に関する詳細な調査
- 省電力を実現する制御プログラムの作成を支援するツールの提案

をそれぞれ行った。

まず、技術動向調査では、従来からある特許出願技術動向調査の手法を用いた分析を行い、特許出願の件数の変化が技術開発の状況変化に直結しているという考えから、その結果によるセンサネットワーク技術における省電力制御の技術の拡がりについての定量的な理解が可能となった。より具体的には、センサネットワーク技術及びその中における省電力制御技術の拡がり、具体的にどのような分野に当該技術が適用されているのか、また、省電力制御が具体的にどのような技術により達成されているのか、について定量的に理解することが可能となった。そして、分析を行う過程において技術文献の性質を示す特許出願の精読により、具体的適用分野におけるより具体的な実例についての情報を得ることもでき、より詳細な情報を得ることもできた。この詳細な情報は本研究の提供するツール作成にも利用されている。

次に、省電力制御を実現する制御プログラム作成を支援するツールの提案では、現時点では様々な制約条件が存在するが、プログラム作成者にとりより簡便で利便性の高いツールの提供が行われたと考える。さらに、特許出願技術動向調査の結果を利用することにより、最適な利用範囲の設定、及び、利便性の高い条件設定入力も実現した。これらにより従来システム開発者が必要であったパラメータの取捨選択という試行錯誤が必要な作業が無くなり、プログラムの作成の労力は格段に削減されると考えられる。また、利用頻度の高い状況に提供するツールが対応しているためシステム開発者の利便性をさらに向上させている。そして、予備実験の結果から実験を行う際に変更するパラメータ数を減らしたことはツール作成の労力削減に大きく寄与する。本研究において前提条件及び制約条件とした内容を排除し、より現実的な状況を考えて場合、変更すべきパラメータの数を減らすことはツール作成をより簡略化し、作成をより現実的なものにすると考えられる。

また、このツールの提案は、単なる有用なツールの提供であるだけでなく、技術の広がりに対応したセンサネットワーク技術における省電力制御を実現するツールのフレームワークとしての提案であると考えられることもでき、今後の開発が期待される。

7.2 今後の課題

本論文で提案した省電力制御を実現するためのプログラム作成のツールは、先に述べた前提条件、制約条件を含め、限られた環境においてのみ実際に利用できるものである。そこで、当該ツールの利便性をより高め、センサネットワーク技術の広がりにも貢献するために、以下に挙げる課題が存在すると考えられる。

- 対象センサボードの拡大

本論文では、Crossbow 社製 MicaMOTE で用いられるセンサボードとして、温度・光・音等任意のセンシングを擬似的に可能とした MDA300 を用いてシ

ミュレーションを行い、ツールの作成を行った。しかし、MicaMOTE で用いられるセンサボードには、様々なセンシングデータを取得するための各種センサを搭載したものが存在する。そこで、様々なセンシングデータの取得が可能となるように、当該 MDA300 のみではなく、他のセンサボードに対応したツールを提供することは、システム開発者にとって非常に有用であると考ええる。

そして、各種センサボードへの対応は、それらに対応した制御プログラムを用いて、本論文の方法と同様に PowerTOSSIM を用いたシミュレーションを行い、変化するパラメータに対応した消費電流量の値を得ることにより実現される。あわせて、センサボードに搭載されたセンサの諸元データも必要となる。また、Crossbow 社製 MicaMOTE 以外のセンサデバイスにおいても、PowerTOSSIM と同様に消費電流量を取得するツールが存在するのならば、フレームワークとしてのツール提案を利用し、システム開発者の利便性を向上させることに貢献できると考える。

- 省電力制御に影響を与える各種パラメータへの対応

本論文では、省電力制御に影響を与える各種パラメータのうちセンシング間隔、通信間隔のみを対象としてシミュレーション、ツール作成を行った。しかし、省電力制御に影響を与えるパラメータは先に述べたように他にも存在し、実際にはそれらによる影響を考慮する必要があると考えられる。

この各種パラメータへの対応は、制御プログラムのうち対応する箇所の修正、変更を行ったシミュレーションを行い、対応した消費電流量の値を得ることにより実現される。

- センサデバイス配置

本論文では、センサデバイス配置は grid 配置であると仮定してシミュレーションを行っている。しかし、実際の利用においてセンサデバイスの配置は、

grid 配置のように均一ではなく、ランダムに配置されている。

センサデバイスがランダムに配置された場合、隣接するセンサデバイスのうちいずれのセンサデバイスに通信を行うのかは不明である。そのため、各センサデバイスの通信頻度等センサデバイス間の通信に関しての制御が変化し、消費電流量に対する影響が発生すると考えられる。そこで、解決方法としてランダム性を考慮するために、センサデバイス間の通信に確率論の考え方を導入してシミュレーションを行う手法が考えられる。

- 制御プログラムの最適化

本論文では、提案したツールにより作成される省電力制御を実現するための制御プログラムは、最適化を行っていない。シミュレーションで得られた結果をベースとなる制御プログラムに適用しているのみである。したがって、実際には搭載されているセンサによるセンシングが行われない箇所等不要な制御プログラムも含む形式となっている。

そこで、ツールにおいて制御プログラムの不要な箇所を削除して制御プログラムの作成を行うようにすれば、若干ではあるが制御プログラムの実行の際の消費電流が削減されることが考えられる。だが、本論文で用いたシミュレーション環境である PowerTOSSIM はイベント駆動型のシミュレーション環境であるために、制御プログラムのうち不要な箇所、すなわちイベントが発生しない箇所の消費電流量は考慮していないため、その消費電流量の減量は不明である。

- TOSSIM の plug-in 化

さらに、対象センサデバイスを Crossbow 社製 MicaMOTE と考えた場合、提案されるツールを TOSSIM の plug-in 化することは非常に有用であると考えられる。実際には、先に述べた対象センサボードの拡大等機能を充実させる必要があるが、システム開発者の利便性はさらに高まると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、いろいろな方々にお世話になりました。

まず、指導教員の多田好克先生、佐藤喬助教には日頃から熱心なご指導、そしてご鞭撻を賜りました。また、ご多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり、大変貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、本研究が行なえたことは、研究方針や方法論について議論をし、共に研究生活をおくってきた多田研、そして小宮研、村山研、水野研の学生諸氏のおかげでもあります。これらの皆さんに感謝いたします。

そして、研究を続けることに理解をしてくれた妻、子供たちがいてくれたことが研究への活力でした。休日に家庭を空けることが多く、多大な苦勞と迷惑をかけ、大変すまない気持ちでいっぱいです。最後になりますが、多大なる感謝をいたします。

参考文献

- [1] 阪田史郎, 田中成興, 西室洋介, 川崎光博, 福井潔, ユビキタスネットワークイン
グフォーラム センサーネットワーク部会, “ZigBee センサーネットワーク 通
信基盤とアプリケーション”, 秀和システム 2005.
- [2] 愛・地球博, <http://www.expo2005.or.jp/jp/>, January 2010.
- [3] 子ども見守りシステム, <http://panasonic.co.jp/pss/rd/usn/>, January 2010.
- [4] Prabal K. Dutta and David E. Culler, “System Software Techniques for Low-
Power Operation in Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 2005 IEEE/ACM
International conference on Computer-aided design, 2005, pp. 924–931.
- [5] Seok-cheol Lee, Sam-bum Shin, Hyun-suk Hwang and Chang-soo Kim, “A
Study on the Circular Sensing Model with a Low Power Profile in Wireless
Sensor Networks,” SERA 2007. 5th ACIS International Conference Aug. 2007,
pp. 616–624.
- [6] D.E. Hill and J.L. Culler, “Mica: a wireless platform for deeply embedded
networks. Micro,” IEEE, Vol. 22, pp. 12–24, Nov/Dec 2002.
- [7] Victor Shnayder, Mark Hempstead, Bor-rong Chen, Geoff Werner Allen and
Matt Welsh, “Simulating the power consumption of large-scale sensor network
applications,” Proceedings of the 2nd international conference on Embedded
networked sensor systems, Nov. 2004, pp. 188–200.
- [8] 総務省,
[http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/
yubikitasu_c/index.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu_c/index.html), January 2010.

- [9] 社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA), http://www.bookpark.jp/cm/ieej/detail.asp?content_id=IEEJ-GH1112-PRT, January 2010.
- [10] 電気学会 センサネットワーク調査専門委員会, <http://it.jeita.or.jp/eltech/report/2005/05-jou-5.html>, January 2010.
- [11] Applilet EZ PL,
<http://www.necel.com/micro/ja/development/asia/appliletez-pl/index.html>, January 2010.
- [12] PSoC Designer, <http://www.cypress.com/?id=1147>, January 2010.
- [13] LEGO MINDSTORM, http://mindstorms.lego.com/eng/Overview/NXT_Software.aspx, January 2010.
- [14] MoteView, <http://www.xbow.jp/moteview12.html>, January 2010.
- [15] P. Levis, N. Lee, M. Welsh and D. Culler, “TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications,” Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems 2003, Nov. 2003, pp. 126–137.
- [16] 特許庁, <http://www.jpo.go.jp/shiryou/gidou-houkoku.htm>, January 2010.
- [17] 特許庁, http://www.jpo.go.jp/cgi/link.cgi?url=/shiryou/toukei/nenpou_toukei_list.htm, January 2010.
- [18] SMART DUST., <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>, January 2010.
- [19] About the Center For Future Health., <http://www.futurehealth.rochester.edu/>, January 2010.

- [20] Great Duck Island 2003., <http://www.coa.edu/html/greatduckisland2003.htm>, January 2010.
- [21] mediacup@teco, <http://mediacup.teco.edu/>, January 2010.
- [22] Live E! ~ 活きた地球環境情報 ~, <http://www.live-e.org/>, January 2010.
- [23] Smart Kindergarten - Home -, <http://nes1.ee.ucla.edu/projects/smartkg/>, January 2010.
- [24] 安藤繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南正輝著, “センサネットワーク技術 ユビキタス情報環境の構築に向けて”, 東京電機大学出版局 2005.
- [25] Millennial Net 社., [http://www.millennial.net/.](http://www.millennial.net/), January 2010.
- [26] Pushpin Computing, <http://web.media.mit.edu/lifton/Pushpin/>, January 2010.
- [27] NASA Sensor Web, <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>, January 2010.
- [28] 無線センサネットワーク MOTE MTS/MDA センサ基板 ユーザーマニュアル 日本語ガイド, <http://www.xbow.jp/mtsmdej.pdf>, January 2010.
- [29] TinyOS Community Forum, <http://www.tinyos.net/>, January 2010.